INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



APROXIMACION AL COMETA HALLEY

Noviembre 1988
450 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Noviembre de 1988 Número 146

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Isabel García Acha y Julio Rodríguez Villanueva: *En busca del antioncogén*; Ramón Pascual: *Detección de átomos y moléculas con láseres*; Pilar Ramos Alvarez y Emilio Herrera: *La fábrica de insulina*; Manuel Puigcerver: *El cometa Halley en primer plano*; Esperanza Fernández: *Fósiles de Montceau-les-Mines*; Amando García Rodríguez: *Revestimientos pulverizados con plasma*; Juan Luis Serra: *El descubrimiento de la corteza visual*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

M. Pilar Sesma, Angel Morales y Luis Alonso

Ciencia y sociedad:

E. Cervantes, J. G. De Diego y D. Lemke

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
15-20	F. Moreno, J. I. García de la Rosa y Magda Mària
29	Jorge J. Yunis, Facultad de Medicina de la Universidad de Minnesota
30	Jorge J. Yunis, Gabor Kiss
31-32	Gabor Kiss
33	Thaddeus P. Dryja, Massachusetts Eye and Ear Infirmary
34-35	Gabor Kiss
39	Instituto B. P. Konstantinov de Física Nuclear
40	Andrew Christie
41	Andrew Christie (*arriba, a la izquierda*). Academia de Ciencias de la Unión Soviética (*arriba, a la derecha*), Andrew Christie (*abajo*)
42-43	Andrew Christie
44	Cortesía de E. Kranz, Instituto Max Planck, Colonia
45	MBB; *Spektrum der Wissenschaft*
46	Carl Zeiss/Instituto Max Planck de Astronomía; *Spektrum der Wissenschaft*
53-54	Instituto de Histología y Embriología, Universidad de Ginebra
55, 58	Dana Burns
59-63	Universidad de Ginebra
62	Dana Burns (*arriba*), Universidad de Ginebra (*abajo*)
65	Sociedad francesa de Astronomía
66	Hank Iken
67	Hannes Alfvén y Fritz M. Neubauer; parte inferior reproducida, con permiso, de *Comet Halley 1986: World-Wide Investigations, Results and Interpretations*, dirigido por J. Mason; Ellis Horwood, Ltd., Chichester, 1988
68	Murray Greenfield
69	Donald E. Brownlee
70	H. Uwe Keller
71	*Spektrum der Wissenschaft*
73	Laurie Burnham (*izquierda*), Daniel Heyler (*derecha*)
74	Laurie Burnham (*arriba y abajo, a la derecha*), Daniel Heyler (*abajo, a la izquierda*)
75	Daniel Heyler
76-77	Patricia J. Wynne
78	Joe Lertola
81-86	Plasma-Technik Sulzers AG
82-83	George V. Kelvin
84-85	Herbert Herman (*arriba y centro*), APS Materials, Inc. (*abajo*)
89	Cortesía de la Biblioteca Pública de Nueva York, Fundaciones Astor, Lenox y Tilden. Obsequio de Donald Keene. Fotografía de Robert D. Rubic
90	Carol Donner
91	Biblioteca del Instituto Wellcome
92-93	Mitchell Glickstein
94-95	Andrew Christie
96-99	Michael Goodman
103-105	Hank Iken



LA PORTADA, una pintura basada en las fotografías que tomó la sonda *Giotto*, de la Agencia Espacial Europea, representa el núcleo del cometa Halley (véase, en este mismo número, "El cometa Halley en primer plano", por Hans Balsiger, Hugo Fechtig y Johannes Geiss). El núcleo mide unos ocho por ocho kilómetros. De morfología irregular, su superficie, oscura y rugosa, está señalada por numerosos hoyos y formaciones crateriformes. Del cometa salen en dirección al Sol poderosos chorros de gas y polvo (*arriba*).

Dibujó la portada Ian Worpole

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Carlos Oppenheimer, Josep Maria Farré Josa
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., Managing Editor; Timothy Appenzeller, Associate Editor; Timothy M. Beardsley; John M. Benditt; Laurie Burnham; Elizabeth Corcoran; Ari W. Epstein; Gregory R. Greenwell; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, Book Editor; Tony Rothman; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Karen Wright
PUBLISHER Harry Myers
ADVERTISING DIRECTOR Peter B. Kennedy
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	4950	9000
Extranjero	5500	10.000

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 450 pesetas
Extraordinario: 575 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S. A. Buenos Aires, 51 - 08902 Hospitalet (Barcelona)

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

José M.ª López Piñero

...cien años

Santiago Ramón y Cajal sentó las bases de la teoría de la neurona con sus investigaciones con el método de Golgi.

En 1887, siendo todavía catedrático en Valencia, fue nombrado miembro de un tribunal de oposiciones y residió unos días en Madrid, que aprovechó para visitar los principales laboratorios micrográficos allí existentes. Estuvo, por supuesto, en el de la Facultad de Medicina, con Leopoldo López García y Aureliano Maestre de San Juan, a quien pocos meses después dejaría ciego un desgraciado accidente de laboratorio, y que merecería de Cajal un emocionado recuerdo: "El buenísimo de Don Aureliano, a quien tanto venerábamos sus discípulos, sucumbió de las resultas de un accidente de laboratorio. Una salpicadura de sosa cáustica, producida por la ruptura de un frasco, determinó la pérdida de la vista, a que siguió una pasión de ánimo tan grande, que arrebató en pocos meses al maestro. Fue el doctor Maestre un excelente profesor que sabía comunicar sus entusiasmos a quienes le rodeaban. Yo le debo favores inolvidables. Tras haberme apadrinado en la ceremonia de investidura de doctor, me animó insistentemente durante mis ensayos de investigador, fortaleciendo mi confianza en las propias fuerzas. Las cartas con que acusaba recibo de mis publicaciones constituían para mí tónico moral de primer orden". También fue Cajal en 1887 al laboratorio de Federico Rubio e, incluso, al instalado en el Museo de Historia Natural bajo la dirección del biólogo Ignacio Bolívar. No obstante, la visita que influyó decisivamente en su trayectoria científica, decidiéndole a consagrarse a la investigación histológica del sistema nervioso, fue la que realizó al laboratorio de Luis Simarro.

Simarro, a pesar de ser solamente tres años mayor que Cajal, era ya una de las figuras jóvenes de la histología en la España de este momento histórico. Conviene ahora solamente recordar que, tras su formación en Valencia y Madrid, había trabajado en París desde 1880 a 1885 junto a Mathias Duval, Louis Antoine Ranvier, Jean Martin Charcot y Valentin Magnan, todos ellos figuras de primera importancia en los saberes acerca del sistema nervioso. Simarro perfeccionó entonces su ya notable preparación de micrógrafo, orientándose de modo definitivo hacia la neurohistología, al mismo tiempo que se consagraba como clínico a la neuropsiquiatría. "Debo a L. Simarro, el afamado psiquiatra y neurólogo de Valencia —afirmó luego Cajal en sus memorias—, el inolvidable favor de haberme mostrado las primeras buenas preparaciones con el proceder del cromato de plata, y de haberme llamado la atención sobre la excepcional importancia del libro del sabio italiano, consagrado a la inquisición de la fina estructura de la sustancia gris. Merece contarse el hecho, porque sobre haber tenido importancia decisiva en mi carrera, demuestra una vez más la potencia vivificante y dinamógena de las cosas vistas." Cajal se refería, por supuesto, al profesor de Pavía, Camillo Golgi —con quien compartiría en 1906 el premio Nobel de Medicina—, a su tratado *Sulla fina anatomia degli organi centrali del sistema nervoso* (1886) y a su método de impregnación cromoargéntica, primera técnica que permitía teñir de modo preciso y selectivo las células nerviosas y sus prolongaciones. "A mi regreso a Valencia —continúa diciendo en sus *Recuerdos*— decidí emplear en grande escala el método de Golgi y estudiarlo con toda la paciencia de que soy capaz. Innumerables probaturas, hechas por Bartual y por mí, en muchos centros nerviosos y especies animales, nos convencieron de que el nuevo recurso analítico tenía ante sí brillante porvenir." Estos ensayos con su discípulo Juan Bartual Moret —que luego sería el primer catedrático de Histología de la Universidad de Valencia— quedaron interrumpidos por el traslado de Cajal, a finales de aquel mismo año, a Barcelona, ciudad que iba a ser el escenario de una etapa radicalmente distinta de su trayectoria científica.

Siendo ya catedrático en Barcelona, Cajal convirtió el método de Golgi en la primera arma técnica de su obra de investigador, sobre todo después de introducir la modificación que denominó "proceder de doble impregnación", que permitía obtener tinciones muy claras y casi constantes, incluso en las estructuras nerviosas más complejas. Por otra parte, consideró como "resorte principal" y "causa verdaderamente eficiente" de sus espectaculares descubrimientos la utilización del método ontogénico, es decir, el estudio de los centros nerviosos de embriones de aves y mamíferos, en lugar de comenzar directamente con los de animales adultos, como hasta entonces se había hecho. Explicó esta alternativa con una metáfora muy expresiva: "El (medio) más natural y sencillo al parecer, pero en realidad el más difícil, consiste en explorar intrépidamente la selva adulta, limpiando el terreno de arbustos, plantas parásitas, y aislando cada especie arbórea tanto de sus parásitos como de sus congéneres. (...) Mas semejante táctica resulta poco apropiada a la dilucidación del problema propuesto, a causa de la enorme longitud y extraordinaria frondosidad del ramaje nervioso, que inevitablemente aparece mutilado y casi indescifrable en cada corte (...). Puesto que la selva adulta resulta impenetrable e indefinible, ¿por qué no recurrir al estudio del bosque joven, como si dijéramos, en estado de vivero? (...) Escogiendo bien la fase evolutiva (del embrión) las cé-

lulas nerviosas, relativamente pequeñas, destacan íntegras dentro de cada corte; las ramificaciones terminales del cilindroeje dibújanse clarísimas y perfectamente libres; los nidos pericelulares, esto es, las articulaciones interneuronales, aparecen sencillas, adquiriendo gradualmente intrincamiento y extensión; en suma, surge ante nuestros ojos, con admirable claridad y precisión, el plan fundamental de la composición histológica de la sustancia gris".

Sobre estas bases, Cajal se dedicó a la investigación, "no ya con ahínco, sino con furia". Su actividad científica durante 1888 y 1889 fue tan intensa que, para dar a conocer sus trabajos, además de enviar artículos a diferentes publicaciones periódicas, tuvo que editar a su costa una *Revista Trimestral de Histología Normal y Patológica*, de la que solamente aparecieron tres números. Sin embargo, los diez trabajos que publicó en ella abrieron una nueva etapa en el conocimiento de la estructura del sistema nervioso.

En el trabajo que inició dicha serie, titulada "Estructura de los centros nerviosos de las aves", Cajal demostró por vez primera con datos inequívocos que las ramificaciones de las neuritas no acaban en la sustancia gris en una red difusa, sino mediante arborizaciones libres. Lo consiguió, en concreto, al estudiar el axón de las llamadas *células estrelladas pequeñas* de la capa molecular del cerebelo. A esta observación crucial añadió, tres meses después, otros dos hallazgos de parecida importancia, en el artículo "Sobre las fibras nerviosas de la capa molecular del cerebelo": el primero fue el descubrimiento del axón de los *granos*, diminutas células de la corteza cerebelosa, que se divide a diversas alturas en ángulo recto, produciendo unas larguísimas proyecciones que denominó *fibras paralelas* por discurrir paralelamente al sentido de la circunvolución cerebelosa; el segundo, el de las *fibras trepadoras* que, procedentes de los ganglios de la protuberancia, cruza sin ramificarse las capas de los granos para contactar con las células de Purkinje, elementos de grueso soma piriforme descritos por este gran histólogo checo en 1838. Ambos hallazgos volvieron a confirmar que la transmisión de los impulsos nerviosos se hacía por contacto, desmintiendo de modo terminante la teoría reticular.

Casi simultáneamente, en dos trabajos aparecidos en mayo y agosto de 1888, Cajal consiguió también reducir a los nuevos supuestos la estructura de

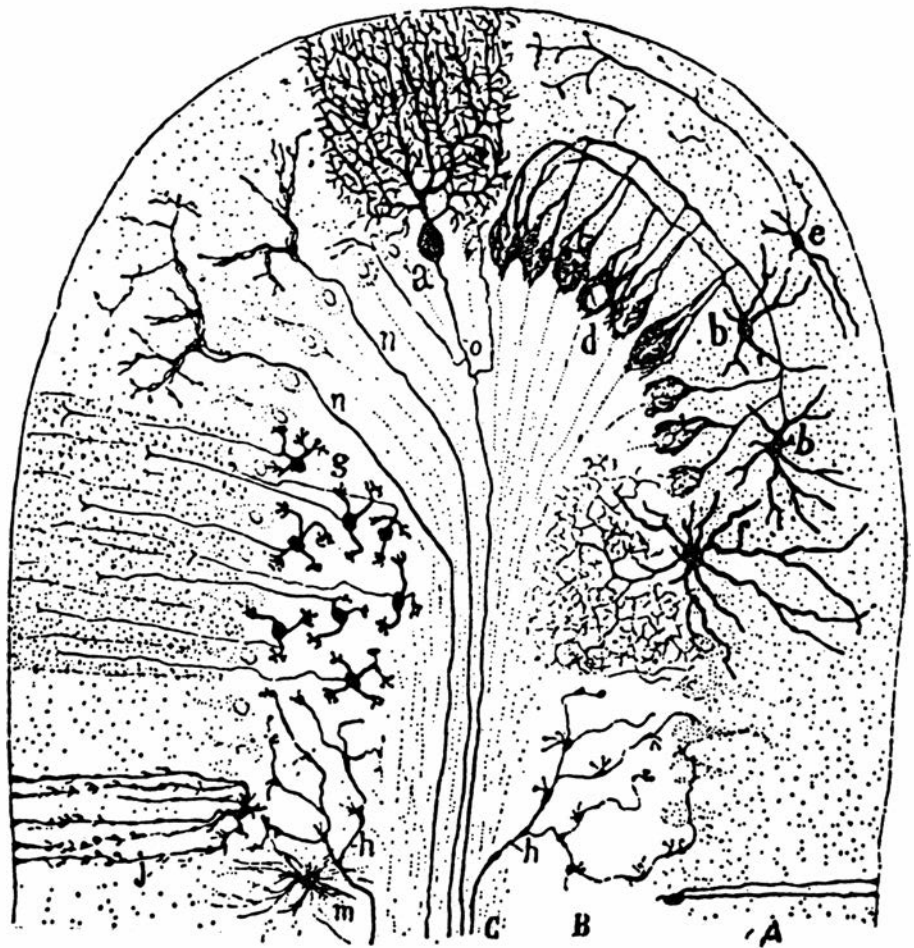


Fig. 1. El cerebelo y la retina fueron las primeras zonas en las que Cajal demostró en 1888 el "nuevo concepto de la histología del sistema nervioso". Corte transversal semiesquemático de una circunvolución cerebelosa de mamífero: A) zona molecular; B) zona de los granos; C) zona de sustancia blanca; a) célula de Purkinje vista de plano; b) células estrelladas pequeñas de la zona molecular; d) arborizaciones finales descendentes que rodean las células de Purkinje; e) células estrelladas superficiales; g) granos con sus cilindroejes ascendentes bifurcados en i; h) fibras musgosas; j) célula neuróglica en penacho; n) fibras trepadoras; m) célula neuróglica de la zona de los granos; f) células estrelladas grandes de la zona de los granos.

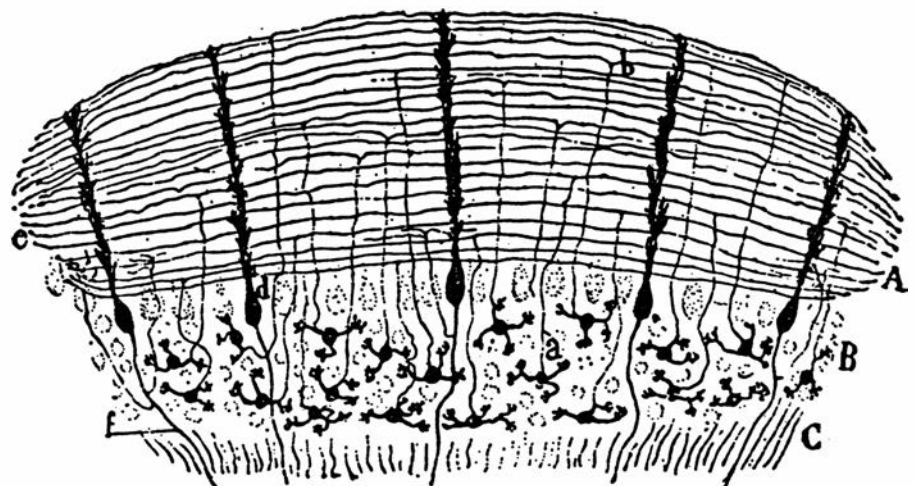


Fig. 2. Corte longitudinal de una circunvolución cerebelosa. Figura semiesquemática: A) zona molecular; B) zona de los granos; C) zona de sustancia blanca; a) cilindroeje ascendente de un grano; b) bifurcación de este cilindroeje y formación de una fibra paralela; d) célula de Purkinje vista de perfil; e) extremidad granulosa terminal de las fibrillas paralelas; f) cilindroeje de una célula de Purkinje.

la retina, que continuaría después investigando varios años hasta la aparición de su clásica monografía sobre el tema, primero en francés (1892) y luego en alemán (1894). El tercer territorio en el que demostró la individualidad de las células nerviosas y la terminación por contacto de sus prolongaciones fue la médula espinal, en la que concentró sus esfuerzos durante 1880. No solamente volvió a desmentir la existencia en la sustancia gris medular de una red difusa protoplásmica y axónica o solamente axónica, sino que dio a conocer la arquitectura celular y la disposición de las vías que constituyen esta porción intrarraquídea del sistema nervioso. Como afirma Diego Ferrer, en sus trabajos sobre la misma, "pudo establecer la marcha de la corriente nerviosa y las bases anatómicas que explican el paso de la excitación de los actos reflejos". Resulta casi increíble que, en marzo de aquel mismo año, publicara, además, un trabajo acerca de la estructura del lóbulo óptico y el orden de los nervios ópticos, en el que demostró que la terminación de las fibras nerviosas sensoriales llegadas de la retina se realiza también por contacto, mediante arborizaciones libres en torno a las células.

Cajal resumió su *nueva verdad* de 1888 a 1889 sobre la morfología y las conexiones de las células nerviosas en la sustancia gris, en cuatro puntos o leyes, que consideró "puro resultado inductivo del análisis estructural de cerebelo (...) confirmadas después en todos los órganos nerviosos explorados:

"1. Las ramificaciones colaterales y terminales de todo cilindroeje acaban en la sustancia gris, no mediante red difusa, según defendían Gerlach y Golgi con la mayoría de los neurólogos, sino mediante arborizaciones libres, dispuestas en variedad de formas (*cestas* o *nidos* pericelulares, ramas trepadoras, etcétera.)

"2. Estas ramificaciones se aplican íntimamente al cuerpo y dendritas de las células nerviosas, estableciéndose un contacto o articulación entre el protoplasma receptor y los últimos ramúsculos axónicos.

"De las referidas leyes anatómicas despréndense dos corolarios fisiológicos:

"3. Puesto que el cuerpo y dendritas de las neuronas se aplican estrechamente (a) las últimas raicillas de los cilindroejes, es preciso admitir que el soma y las expansiones protoplásmicas participan en la cadena de conducción, es decir, que reciben y propagan el impulso nervioso, contrariamente a la opinión de Golgi, para quien dichos segmentos celulares desempeñarían un papel meramente nutritivo.

"4. Excluida la continuidad sustancial entre célula y célula, se impone la opinión de que el impulso nervioso se transmite por contacto, como en las articulaciones de los conductores eléctricos o por una suerte de inducción, como en los carretes de igual nombre".

Cajal se preocupó inmediatamente de difundir internacionalmente los resultados de sus investigaciones, con clara conciencia de que no bastaba enviar ejemplares de su revista o separatas de sus artículos a destacadas figuras científicas europeas. Por ello, a finales de 1889 y comienzos de 1890, publicó traducciones francesas de tres trabajos suyos donde exponía los hallazgos más importantes que había conseguido acerca de la estructura del cerebelo, la retina y la médula espinal. El primero apareció en el *Monatschrift* dirigido por Wilhelm Krause, que había acogido ya algunas de sus aportaciones primerizas. Los otros dos, en el *Anatomischer Anzeiger*, órgano de expresión de la Sociedad Anatómica Alemana, que entonces funcionaba en la práctica como asociación internacional de los cultivadores de las ciencias morfológicas. Sin embargo, la acogida que tuvieron estas publicaciones no pudo ser más decepcionante. La condición marginal de la

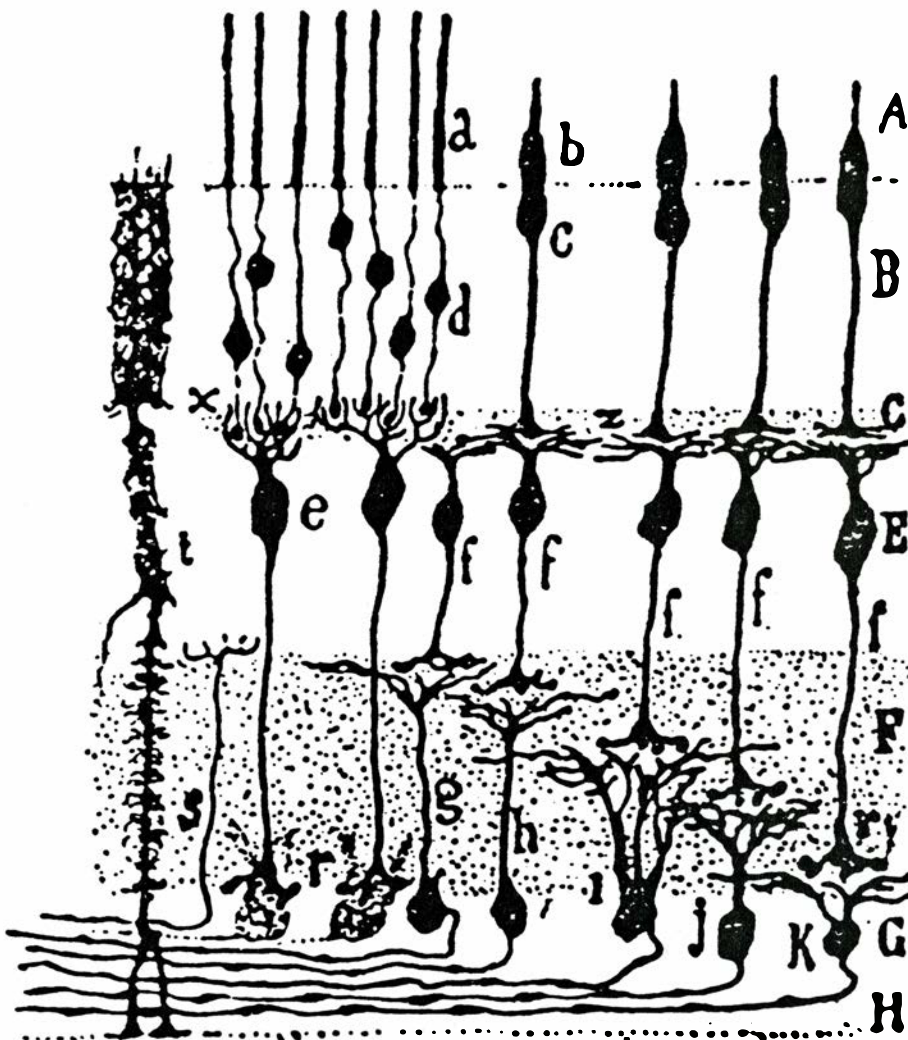


Fig. 3. Corte transversal de la retina de un mamífero: A) capa de los conos y bastones; B) cuerpos de las células visuales (granos externos); C) capa plexiforme externa; E) capa de las células bipolares (granos internos); F) capa plexiforme interna; G) capa de las células ganglionares; H) capa de las fibras del nervio óptico; a) bastoncito; b) cono; e) bipolar para bastones; f) bipolares para conos; r) arborización inferior de las bipolares de bastón; r_1*) arborización inferior de las bipolares para cono; g), h), i), j), k) células ganglionares arborizadas en los distintos pisos de la zona plexiforme interna; x) contacto entre los bastones y sus bipolares; z) contacto entre los conos y sus bipolares; t) célula de Müller o epitelial; s) fibra nerviosa centrífuga.*

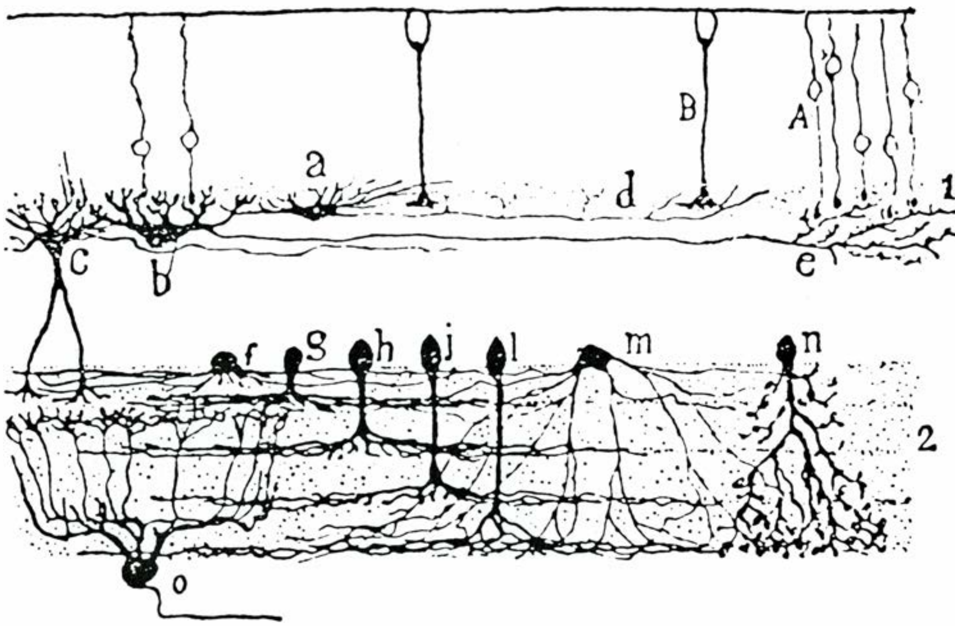


Fig. 4. Corte perpendicular de una retina de mamífero: A) granos externos o cuerpos de los bastoncitos; B) cuerpo de cono; a) célula horizontal externa o pequeña; b) célula horizontal interna o grande; c) célula horizontal interna con apéndices protoplásmicos descendentes; e) arborización aplanada de una de estas células grandes; f), g), h), j), l) espongioblastos arborizados en los distintos pisos de la zona plexiforme interna; m), n) espongioblastos difusos; o) célula ganglionar biestratificada; 1) zona plexiforme externa; 2) zona plexiforme interna.

actividad científica española en la biomedicina europea de la época y también las dificultades que la mayoría de los histólogos habían tenido al utilizar el método de Golgi contribuyeron, sin duda, a que los trabajos de Cajal fueran inicialmente recibidos con desconfianza. No obstante, la principal dificultad residía en la misma importancia de sus descubrimientos y en el hecho de que contradijeran frontalmente las ideas generalmente admitidas. El húngaro Mihály Lenhossék, destacado neurohistólogo que entonces era catedrático en Basilea, manifestó en 1890 de una forma muy significativa su incredulidad ante un revolucionario hallazgo de Cajal relativo a la estructura de la médula espinal: "Resulta muy sorprendente que hecho tan cardinal no haya sido sorprendido por nadie, no obstante haber sido la médula explorada desde hace cincuenta años en todas direcciones y con todos los métodos". Otro neurohistólogo de parecida talla, el belga Arthur van Gehuchten, recordaría un cuarto de siglo después que "los hechos descritos por Cajal en sus primeras publicaciones resultaban tan extraños, que los histólogos de la época los acogieron con el mayor escepticismo".

Para superar dicha desconfianza, Cajal decidió aprovechar el congreso que la Sociedad Anatómica Alemana iba a celebrar en Berlín a comienzos de octubre de 1889, mostrando en él las preparaciones más claramente demostrativas de sus descubrimientos. En dicho congreso, tras la lectura y discusión de las ponencias y comunicaciones orales, se dedicó un día a las demostraciones prácticas, sección en la que estaba inscrito Cajal. "Desde muy temprano —afirma en sus *Recuerdos*— me instalé en la sala laboratorio *ad hoc*, donde en largas mesas y enfrente de amplios ventanales, brillaban numerosos microscopios. Desembalé mis preparaciones; requerí dos o tres instrumentos amplificantes, además de mi excelente modelo Zeiss, traído por precaución; enfoqué los cortes más expresivos concernientes a la estructura del cerebelo, retina y médula espinal y, en fin, comencé a explicar, en mal francés, ante los curiosos, el contenido de mis preparaciones". Según el testimonio de Van Gehuchten, Cajal estaba solo, "no suscitando en torno suyo sino sonrisas incrédulas. Todavía creo verlo tomar aparte a Kölliker, entonces maestro incontestable de la histología alemana, y arrastrarlo a un rincón de la sala de demostraciones, para mostrarle en el microscopio sus admirables preparaciones y convencerle al mismo tiempo de la realidad de los hechos que pretendía haber descubierto. La demostración fue tan decisiva que, algunos meses más tarde, el histólogo de Würzburg confirmaba todos los hechos afirmados por Cajal".

El escepticismo inicial de Kölliker se convirtió en vivo interés cuando observó las clarísimas imágenes de las preparaciones del aragonés y éste le explicó —según anota en sus *Recuerdos*— "en un francés chabacano, menuda y pacientemente, todos los pequeños secretos de manipulación de la reacción cromo-argéntica". Inmediatamente después, Kölliker realizó una serie de trabajos de confirmación, utilizando la técnica de la doble impregnación, que le hicieron abandonar la teoría reticular y aceptar plenamente las concepciones de Cajal. Los dos primeros, dedicados al cerebelo y la médula espinal, aparecieron en 1890 en su propia revista, una de las más influyentes de la morfología de la época.

Kölliker se encontraba entonces en la cumbre de su prestigio científico, tras casi medio siglo de ejemplar dedicación a la investigación histológica. Su *Handbuch der Gewebelehre des Menschen* —cuya edición original apareció en 1852, el mismo año del nacimiento de Cajal— fue el primer trabajo moderno de la disciplina. En consecuencia, no resulta extraño que su terminante respaldo a las contribuciones del español pesara decisivamente en la trayectoria científica de éste.

Poco después de Kölliker, casi todas las grandes figuras de la neurohistología europea asimilaron los hallazgos de Cajal y aceptaron su nueva concepción de la estructura del sistema nervioso. En el mundo germánico lo hizo el propio Wilhelm His —personalidad de talla parecida a la de Kölliker, a quien ya nos hemos referido— junto a otros importantes investigadores. Entre estos últimos cabe destacar a Heinrich Wilhelm Waldeyer, quien, además de realizar notables aportaciones descriptivas a la anatomía normal y patológica, tuvo el acierto de acuñar varios términos generales que acabaron imponiéndose. Creó, por ejemplo, el término *cromosoma*, así como el de *neurona*, que propuso para designar la célula nerviosa como unidad elemental morfológica y fisiológica, en el sentido de Cajal, en un artículo de revisión "Sobre algunas nuevas investigaciones en el terreno de la anatomía del sistema nervioso central" (1891). En el resto de los países europeos comprobaron y defendieron las ideas de Cajal y las enriquecieron con observaciones propias otros sobresalientes científicos, a la cabeza de los cuales figuraron el sueco Gustav Retzius, el húngaro Mihály Lenhossék —tras superar su desconfianza inicial a la que antes hemos aludido—, el belga Arthur van Gehuchten y el francés Mathias Duval.

Las manchas solares

A pesar de su larga historia como objeto de investigación, estas islas magnéticas de la superficie solar siguen desafiando los conocimientos actuales de electromagnetismo y de hidrodinámica

F. Moreno Insertis y J. I. García de la Rosa

Según nos cuentan las crónicas de la dinastía china Han, cierto día de febrero del año 188 de la era cristiana "el Sol presentaba un color anaranjado y en su interior había un vapor oscuro con forma de urraca en vuelo". No se trata de un testimonio único. Otros 140 más, correspondientes a los anales dinásticos de China, Japón y Corea desde el siglo primero antes de Cristo hasta el XVII de nuestra era, corroboran la observación de las manchas solares a simple vista en la antigüedad. Las noticias que tenemos en Occidente de observaciones parecidas hasta la invención del telescopio en el siglo XVII son, en cambio, muy pocas. Esta escasez no obedece, desde luego, a ningún tipo de desinterés por la astronomía en la Europa anterior al desarrollo de la ciencia empírica moderna; más bien hay que atribuirla a la física aristotélica imperante: de acuerdo con la misma, los cuerpos celestes o supralunares estaban formados de quintaesencia; eran, pues, perfectos, sin "manchas". Si se veían sombras en el Sol había que atribuirlas al paso de planetas, Mercurio o Venus, por delante del disco solar.

En todo caso, resulta difícil distinguir las manchas solares a simple vista, pues sólo una de cada 100 alcanza el tamaño suficiente para ser percibida sin auxilio del telescopio. No es casualidad que la mayoría de las observaciones históricas de manchas se realizasen a la puesta de sol o en condiciones atmosféricas favorables, como cuando hay humo, neblina o polvo en el ambiente que disminuyen el brillo solar. Abundando en esto, dos de las contadas observaciones medievales que se registraron en Occidente, en Rusia exactamente, coinciden con grandes incendios forestales que asolaron dicho país en el siglo XIV.

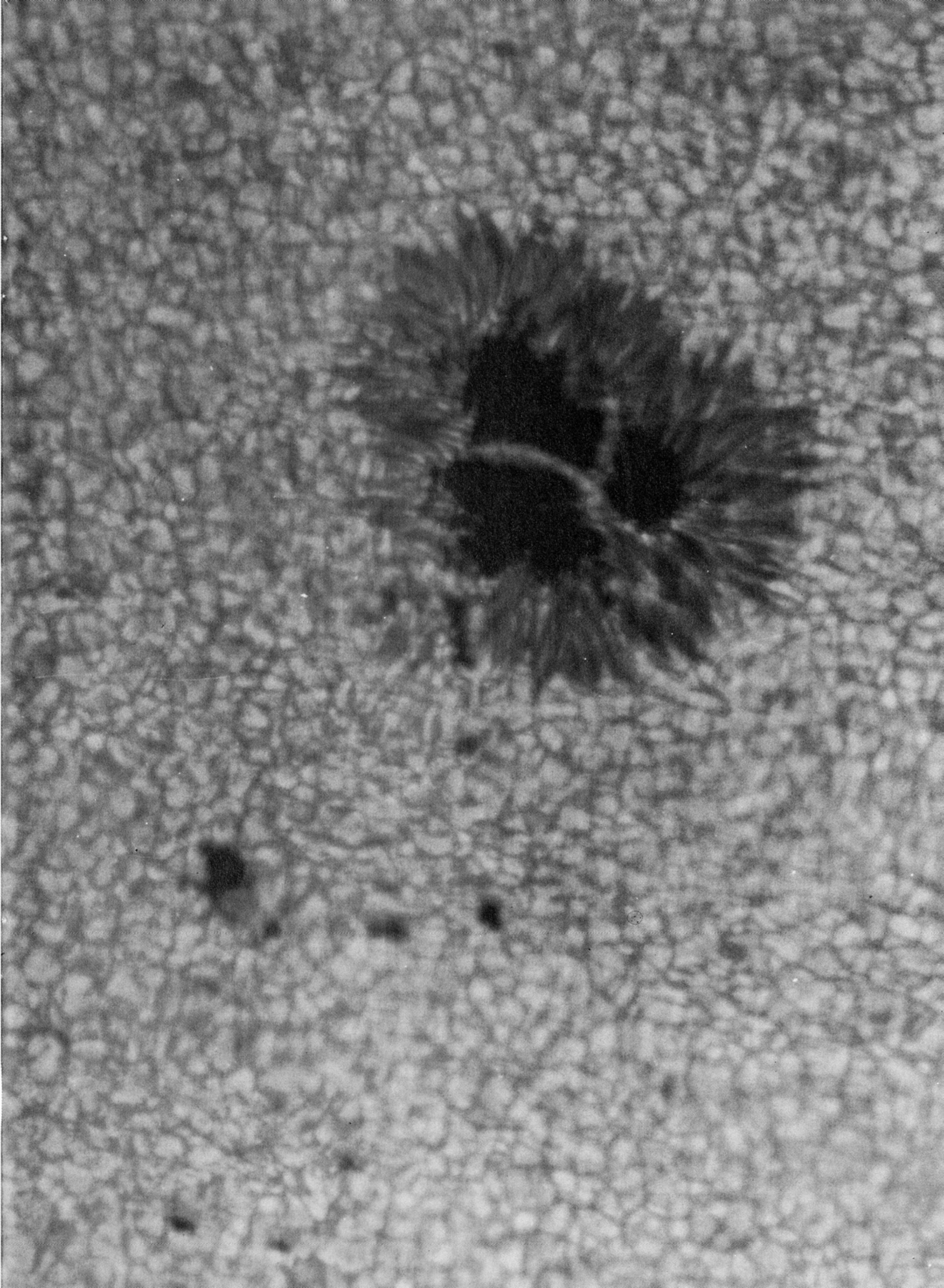
Las primeras observaciones telescópicas de manchas solares se realizaron en torno al año 1610; se produjeron simultáneamente en distintos países europeos, a saber, por Galileo Galilei en Italia, Christopher Scheiner en Alemania, Johannes Fabricius en Holanda y Thomas Harriot en Inglaterra. De los cuatro, Galileo pasará a la historia como el primero en atreverse a considerar las manchas fenómenos que ocurrían *en* el propio disco solar, rebatiendo, con uno de sus hábiles argumentos geométricos, la teoría rival del paso de planetas por delante del Sol. No obstante el carácter rudimentario de los primeros telescopios, hemos de reconocer la alta calidad de las observaciones de la época; la extraordinaria paciencia y habilidad para el dibujo de esos primeros observadores les permitió realizar una descripción de la morfología de las manchas solares que era correcta en sus grandes rasgos.

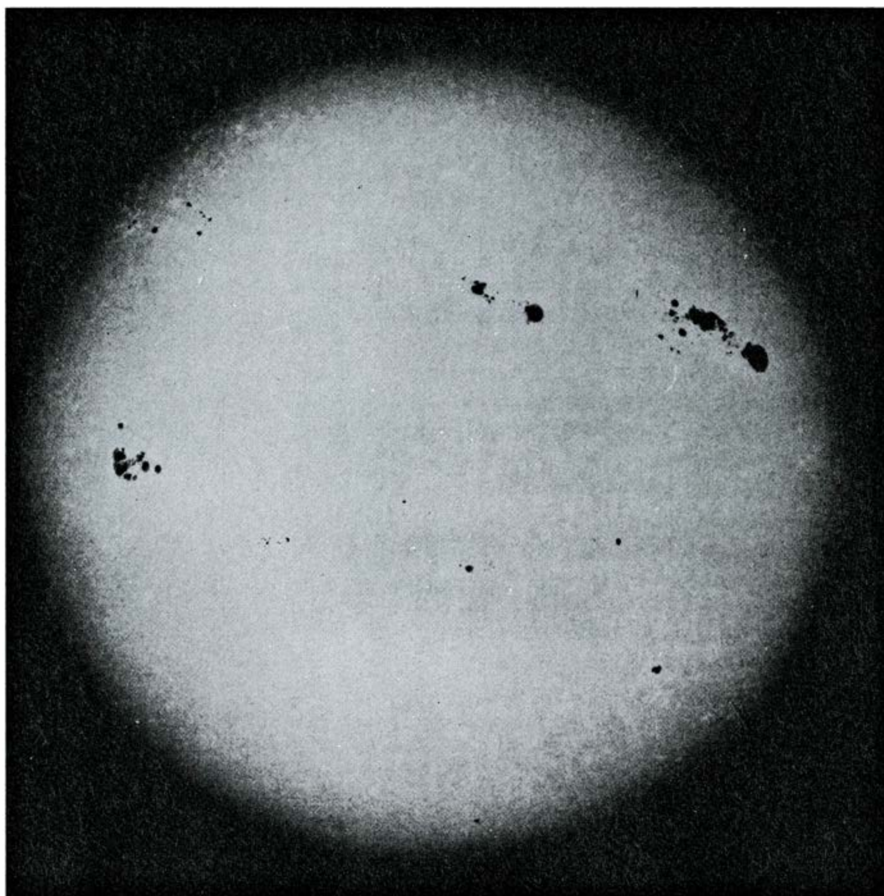
Las manchas son zonas obscuras de varios tamaños sobre la superficie solar. Suelen aparecer en grupos con un número variable de componentes. Durante la vida del grupo, sus componentes cambian de forma y tamaño. Al final de este proceso —que se extiende de días a meses— las manchas desaparecen de la superficie. Algunos elementos del grupo alcanzan en el momento de mayor desarrollo una forma regular, más o menos circular. Se distingue entonces en la mancha una parte central obscura, la *umbra* (sombra, en latín), rodeada de una zona algo más brillante y filamentosa, la *penumbra*.

Con los conocimientos del primer tercio del siglo XVII sobre la distancia que media entre la Tierra y el Sol, ya se podía inferir que las manchas eran objetos enormes. Hoy sabemos que los mayores ejemplares cubren varias decenas de miles de kilómetros de diámetro. Para hacernos una idea de esa cifra, recuérdese que el diámetro de la Tierra mide unos 13.000 kilómetros. Lo que es lo mismo: la Tierra entera cabría varias veces en el interior de una mancha. Pero el Sol es, en comparación, un objeto muy grande y las manchas ocupan sólo la diezmilésima parte de su superficie. Scheiner observó, por otro lado, que las manchas se movían todas paralelamente a un círculo máximo del globo solar, y llegó a la conclusión de que el Sol rotaba alrededor de cierto eje y, por tanto, que ese círculo máximo tenía que ser el ecuador solar. Vio, además, que las manchas aparecían sólo en una banda de 60 grados en latitud, 30 grados al norte y al sur del ecuador, equivalente, por tanto, a la zona tropical terrestre. Quizá por una analogía natural con la

F. MORENO INSERTIS y J.I. GARCIA DE LA ROSA son astrónomos del Instituto de Astrofísica de Canarias. Insertis se formó como investigador en el Instituto Max Planck de Astrofísica de Garching (Alemania), en donde trabajó durante 4 años, habiendo obtenido el doctorado en física por la Universidad Ludwig-Maximilian de Munich en 1984. Su especialidad es la astrofísica teórica y, en particular, el estudio de fenómenos magnéticos en los plasmas cósmicos. La actividad como investigador de García de la Rosa se centra en la observación de diferentes fenómenos solares tales como el nacimiento de manchas, formación de la penumbra de las mismas, etcétera. Obtuvo el master en astrofísica en la Universidad de Sussex (Inglaterra) y el doctorado en física en la Universidad de La Laguna en 1983. Ambos autores imparten, además, cursos de segundo y tercer ciclo en el departamento de astrofísica de la Universidad de La Laguna.

1. MANCHA SOLAR observada con el telescopio Newton al vacío de 40 centímetros, situado en el Observatorio del Teide. En ella pueden apreciarse las partes principales: la umbra, correspondiente al núcleo central obscuro, que en este caso se halla fragmentado en tres trozos, y la penumbra filamentosa que la rodea. El tamaño de esta mancha equivale a algo más de dos veces el diámetro de la Tierra.





2. EL DISCO SOLAR fotografiado en luz blanca muestra varias regiones activas con manchas. Para el observador terrestre, la superficie del Sol varía continuamente en virtud de la rotación y evolución de las regiones activas. Una región activa normal dura desde unos días hasta varias semanas; a lo largo de este tiempo, la región nace, se desarrolla y termina por desintegrarse en fragmentos que desaparecerán. El lugar de formación de las manchas se limita a dos cinturones de actividad que alcanzan hasta latitudes de 30° a ambos lados del ecuador solar. Esta fotografía, obtenida durante un máximo del ciclo solar de 11 años, muestra 10 regiones activas de diversos tamaños. Nos hallamos ahora en la fase de ascenso, sorprendentemente activa del ciclo 22, iniciado en septiembre de 1986 y cuyo máximo se prevé para 1991.

meteorología terrestre se pensó entonces que las manchas podían ser nubes obscuras o fumarolas que se elevaban sobre la superficie solar.

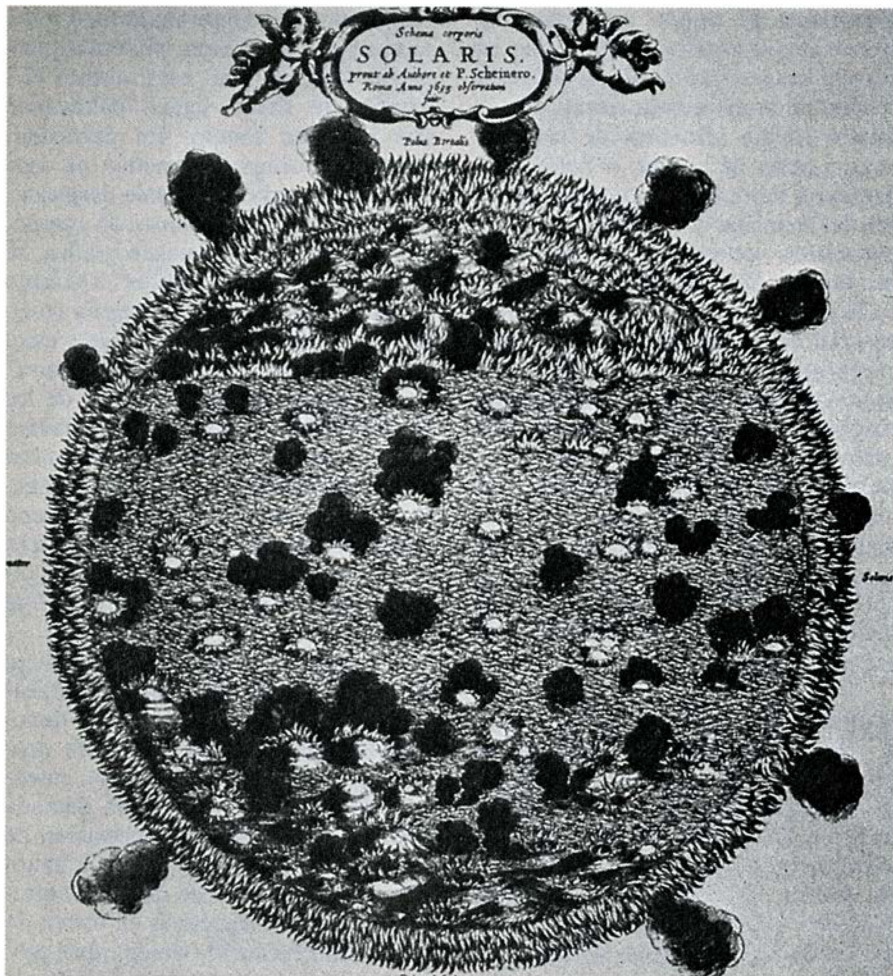
Esta idea sobre la naturaleza de las manchas cambió drásticamente cuando Alexander Wilson (1714-1789), de la Universidad de Glasgow, dio a conocer sus observaciones. El aspecto de una mancha desarrollada, cuando rota desde el centro del disco hacia el borde del Sol, es análogo, según Wilson, al de un plato hondo que fuéramos girando poco a poco hasta verlo de perfil: de frente, su forma es circular, pero mirándolo de canto la pared más alejada de nuestra vista parece más ancha que la cercana. En las manchas, la parte de la penumbra más próxima al borde solar aparece más ancha que la opuesta; apoyándose en ello, Wilson concluyó que las manchas habían de ser depresiones o "agujeros" de la superficie solar. El "efecto Wilson", así llamado en su honor, se incorporó en un modelo ingenuo y erróneo del Sol que, por inaceptable que nos parezca, fue adoptado sin discusión hasta bien entrado el siglo XIX. De acuerdo con el mismo, el interior solar era frío y, posiblemente, estaba habitado; tal interior se vislumbraba a través de los claros (esto es, las manchas) en la densa capa de nubes incandescentes que forman la atmósfera de nuestra estrella. El conocimiento progresivo de las leyes físicas fundamentales a lo largo del siglo pasado puso de manifiesto la imposibilidad de tan curioso modelo.

Poca información se pudo obtener sobre las manchas solares hasta las postrimerías del siglo XIX, que fuera más allá del estudio de su número y distribución en el disco solar. Uno de los descubrimientos más importantes de esa centuria fue el relativo al *ciclo de actividad solar*, descrito por H. Schwabe (1789-1875). En sus observaciones sistemáticas, este aficionado ale-

mán advirtió lo siguiente: el número de manchas registradas no era, ni siquiera en promedio, constante a lo largo del tiempo, sino que aumentaba y disminuía de una manera cíclica, siendo máximo aproximadamente cada 11 años. El estudio de la naturaleza y propiedades físicas de las manchas, sin embargo, no comenzó hasta que se aplicó la fotografía (con Armand Fizeau y Jean Foucault en 1845) y, sobre todo, las técnicas espectroscópicas en la investigación astronómica (segunda mitad del siglo XIX).

Si hacemos pasar la luz solar por un prisma, vemos que se descompone en toda la gama de colores del arco iris, obteniéndose lo que se llama el espectro de la luz. Este fenómeno de dispersión de la luz se utiliza en los aparatos denominados espectrógrafos, con los cuales se puede estudiar la cantidad de luz de un color determinado proveniente del Sol o de otro objeto celeste. De hecho, en el espectro del Sol se ven líneas obscuras superpuestas sobre la luz de un color dado. Esas líneas se deben a que la luz que surge de la superficie del Sol es absorbida en determinadas frecuencias por átomos de la atmósfera solar que se encuentran en su camino hacia nosotros; por eso, a esas líneas obscuras se les denomina líneas espectrales de absorción.

Las líneas espectrales proporcionan abundante información sobre la región del Sol donde se originan. Podemos afirmar que las condiciones físicas de las regiones en donde se forma una línea —pensemos en su temperatura, composición química, densidad, velocidad, campo magnético y muchas propiedades más— dejan su impronta sobre la forma de la misma. Al astrofísico corresponde entonces descifrar la información que portan las líneas espectrales. Por ejemplo, cuando colocamos la rendija de entrada de nuestro espectrógrafo sobre una mancha, apreciamos que las líneas espectrales de la luz



3. DURANTE EL SIGLO XVII, uno de los modelos favoritos (representado en un dibujo de la época debido realizado por A. Kircher fundándose en las observaciones de Christopher Scheiner) consideraba las manchas como fumarolas o nubes oscuras de origen volcánico emitidas desde montañas que sobresalían en un vasto mar de lava líquida. Dicha masa líquida, afectada por mareas análogas a las terrestres, cubriría y descubriría alternativamente los picos de las montañas, justificando la aparición y desaparición de las manchas solares.

proveniente de la mancha difieren notablemente de las que ofrece la fotosfera circundante. Estudiando detalladamente esas diferencias podemos obtener información sobre las condiciones físicas del interior de las manchas y compararlas con las reinantes en la atmósfera solar que las rodea.

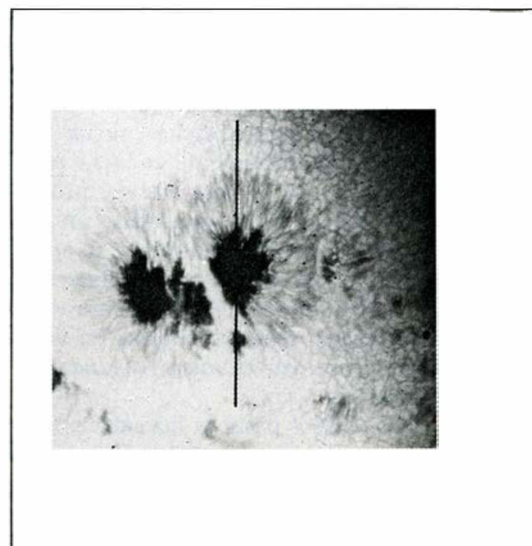
El aspecto obscuro de las manchas débese a que su temperatura es inferior a la de sus alrededores. Lo que no quiere decir que sean frías u obscuras: el brillo de un mancha aislada puede centuplicar el de la Luna llena; su temperatura, aunque 2000 grados por debajo de la de su entorno, se cifra en unos 4000 grados. Temperatura que posibilita que muchos átomos hayan perdido un electrón de su corteza. La nube de electrones resultante proporciona a la mancha una elevada conductividad eléctrica. A la materia caliente y con un grado de ionización elevado se le llama plasma. Del estado de plasma se dice que es el cuarto estado de agregación de la materia; la rama de la física encargada de su estudio incluye, entre sus aplicaciones, objetos y fenómenos tan dispares como la actividad galáctica en el cosmos o la fusión nuclear controlada en laboratorios terrestres. Además de ser más frías, las manchas son menos densas y tienen una presión gaseosa mucho menor que su entorno. Se puede decir que, en comparación con sus alrededores, las manchas están casi vacías. En virtud de esa menor temperatura y densidad, cuando observamos las manchas vemos capas más profundas que cuando observamos los alrededores; por esa misma razón, las manchas parecen depresiones en la superficie del Sol.

De todas formas, el rasgo más notable de las manchas solares reside en su carácter magnético, descubierto en 1908 por G. E. Hale, del observatorio de monte Wilson, en Estados Unidos. Así como la corriente eléctrica que circula por una bobina produce un campo magnético paralelo al eje de las espiras, Hale pensó que las manchas podían ser fenómenos comparables a los huracanes terrestres, pero con la peculiaridad de que su material, eléctricamente cargado, daría lugar a un intenso campo magnético en el eje del remolino.

Hoy en día no se acepta el modelo del huracán. Pero la intuición de Hale no pudo ser más afortunada, pues le llevó a comprobar la realidad del campo magnético de las manchas. Años antes, el físico holandés P. Zeeman había descrito los efectos de los campos magnéticos en las líneas espectrales. Dichos efectos, fundamentalmente el desdoblamiento de algunas líneas, fueron detectados por Hale, quien pudo, además, medir la intensidad del campo descubierto; para su sorpresa, el campo resultaba ser elevado, de unos 3000 gauss. (De aproximadamente medio gauss es el campo magnético terrestre.) Observaciones posteriores llevaron a una determinación de la morfología de las líneas de campo que resultaron constituir una especie de ramillete vertical con la parte más profunda apretada y la superior abierta e inclinada hacia los lados. En el centro de la estructura, el campo magnético sería más intenso y vertical, en contraste con los lados, donde es más débil e inclinado. Ese campo inclinado del contorno de la mancha constituye la penumbra; ésta consta de filamentos obscuros y brillantes.

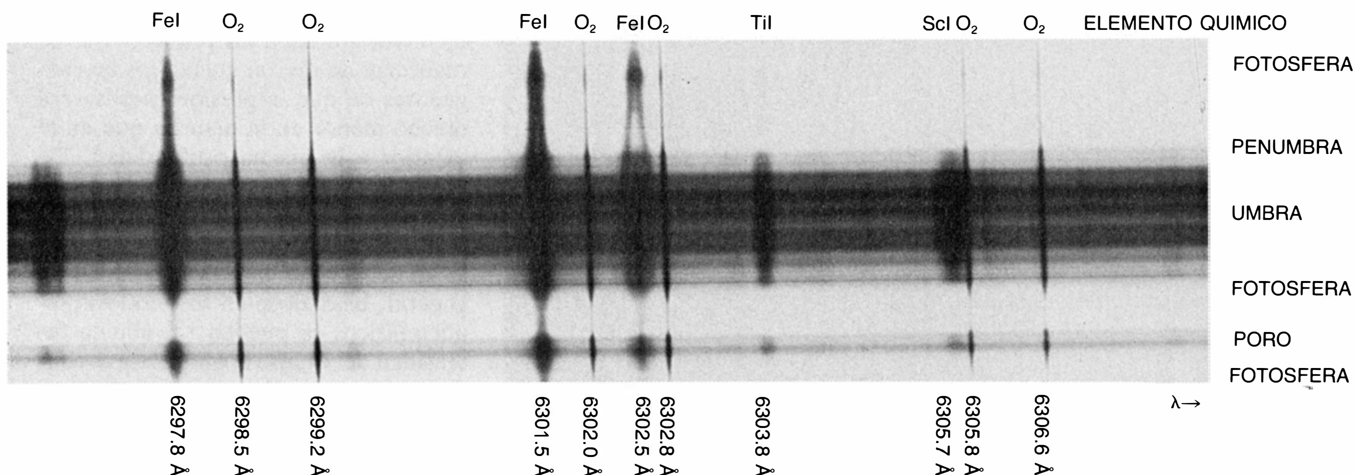
De no ser por la fuerza de las observaciones, difícilmente se hubiera aceptado la existencia de concentraciones gigantescas de campo magnético. Sabemos ya que es muy difícil confinar un plasma magnetizado, tal es la inestabilidad de la estructura resultante. Lo mismo podría afirmarse de las manchas; a pesar de lo cual, el Sol crea gigantescos tubos de flujo magnético que son las manchas y las mantiene como estructuras coherentes, a veces semanas enteras. Parece, sin embargo, que en la superficie del Sol la *intermitencia espacial* del campo magnético no es la excepción, sino la regla. En efecto, nos es ya conocido que casi todo el campo magnético que atraviesa la superficie solar aparece concentrado en estructuras de gran intensidad de campo, por encima del millar de gauss, cuyo tamaño va desde el característico de las manchas, que son las estructuras mayores, hasta pequeños elementos magnéticos de menos de 700 kilómetros de diámetro.

Para estudiar la materia magnetizada del Sol, se acude a una rama especial de la física del plasma, llamada magnetodinámica, que se ha desarrollado en los últimos 50 años, gracias, entre otros, a los notables trabajos de H. Alfvén, T. G. Cowling, S. Chandrasekhar y E. N. Parker. Un resultado destacado de esta teoría, debido a H. Alfvén, es lo que se conoce por "congelamiento de las líneas del campo magnético en el plasma": cuando la conductividad eléctrica de la materia es muy elevada, las líneas del campo se mueven solidariamente con ella. En otras palabras, si observamos el fluido que perfila en un instante dado una cierta línea de campo magnético y dejamos pasar el tiempo, podemos comprobar que, al final, esos mismos elementos de fluido siguen delineando una línea de campo. En particular, cuando el campo magnético es muy fuerte la materia sólo puede desplazarse a lo largo de las líneas de campo, que, utilizando una imagen gráfica, se comportan como "alambres" a lo largo de los cuales se mueve la materia como las cuentas de un collar. Gracias a esto, las líneas de campo se "materializan" de una forma parecida al caso de los alineamientos de limaduras de hierro cerca de un imán. Muchas fotografías de la atmósfera solar permiten directamente visualizar las líneas de campo magnético gracias a que el plasma que se mueve a lo largo de ellas tiene diferente temperatura o densidad que el entorno.



4. ESPECTRO DE UNA MANCHA SOLAR obtenido desde la Torre Solar Sueca del Observatorio del Roque de los Muchachos. La línea oscura visible en

La aparición de una mancha solar es un fenómeno espectacular y complicado en el que la fotosfera, así se denomina la superficie del Sol, sufre profundas modificaciones en una extensión alrededor de la mancha llamada *región o zona activa*. La formación de una zona tal se atribuye hoy a la irrupción en la superficie de una concentración de líneas magnéticas en forma de cuerda, que ha subido desde capas profundas del Sol, en donde se hallaba en posición horizontal. Al ascender desde el fondo, la parte superior del tubo o cuerda magnéticos se va curvando hasta adoptar una forma de U invertida,



la foto de la izquierda representa la ventana delgada por la que penetra la luz a analizar, de forma que la banda oscura central del espectro proviene de la mancha solar, mientras que los extremos superior e inferior corresponden a la fotosfera. Ciertas líneas sensibles al campo magnético, como la de 6302,5 angstrom, muestran sobre la mancha un desdoblamiento. Este efecto Zeeman permite conocer la intensidad y la inclinación del campo magnético de la mancha.

que termina por llegar a la superficie, donde se hace visible.

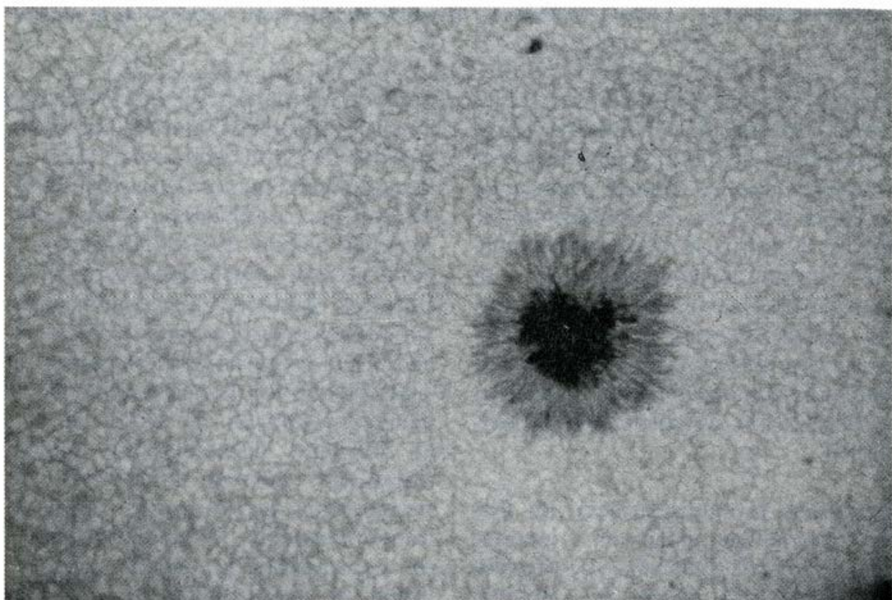
Las observaciones realizadas en los últimos 10 años, entre ellas un amplio programa de seguimiento del nacimiento de 70 regiones activas realizado por uno de los autores (García de la Rosa), permiten corroborar estas ideas: poco después de emerger desde el interior se puede observar la parte central de la cuerda magnética ascendente en forma de pequeños filamentos magnéticos que se arquean sobre la superficie; esta situación varía rápidamente con el tiempo, pues los pies de dichos arcos, que se ven como pequeñas manchas o poros, se alejan mutuamente, indicando que la U invertida sigue ascendiendo. A pesar de su apariencia fragmentaria en la superficie, todos los filamentos que constituyen la cuerda magnética evolucionan de forma coordinada; esto se toma como una indicación de que están anclados en una zona determinada de una capa profunda, desde donde se controla su movimiento, como si se tratara de racimos de globos. A las pocas horas, los poros de las bases de los arcos magnéticos tienden a reunirse y formar manchas, de tamaño cada vez mayor a medida que se les van añadiendo más elementos. Las bases o pies de los arcos, que tienen polaridad magnética opuesta, continúan separándose uno del otro a lo largo de los primeros dos o tres días del desarrollo de la zona activa. Al final del proceso de emergencia de la cuerda magnética quedan una pareja de manchas de polaridad opuesta (en muchos casos, dos grupos de manchas separados entre sí), correspondientes a los brazos verticales de la U; la parte curva de la misma dibuja un gigantesco arco magnético que las conecta alcanzando las capas más altas de la atmósfera solar. En la zona que rodea a estas manchas o grupos de manchas ocurren multitud de fenómenos de origen magnético, incluso después de que las manchas hayan desaparecido. Por eso se le denomina zona activa; su tamaño puede llegar a ser de hasta 300.000 kilómetros.

Durante la emergencia de los filamentos que luego van a juntarse y formar poros y manchas, se produce un fenómeno de colapso de la materia en su interior, de fundamental importancia para la estructura posterior de la mancha. El campo magnético de los primeros momentos de la región activa sólo alcanza un valor de unos 600 gauss. Sin embargo, el campo de las manchas es mucho más intenso, hasta multiplicar por cinco o seis veces esa cifra. ¿Por qué?

La transición entre ambos valores de campo se produce a lo largo de la evolución de los filamentos inmediatamente después de emerger. Lo que ocurre es que la materia del interior de los filamentos, al llegar a la superfie, se enfría, adquiriendo mayor densidad y escurriéndose por las líneas de campo. La materia que baja no puede sustituirse dentro del filamento con la rapidez debida; por una parte, la materia exterior al tubo no puede cruzar libremente las líneas de campo en virtud del fenómeno de congelación antes explicado. Tampoco es de esperar que descienda mucha cantidad de materia de capas superiores de la atmósfera solar, pues éstas son mucho menos densas que la fotosfera. Por consiguiente, el filamento se vacía, siendo su presión gaseosa a partir de ahora mucho menor que la del contorno. Pero los alrededores siguen teniendo la misma presión de antes, de modo que comprimen el filamento, el cual sólo opone la resistencia de las fuerzas magnéticas. En virtud de ello, el filamento disminuye su tamaño transversal y aumenta su intensidad de campo hasta que la presión debida al campo magnético, la presión magnética, contrarresta la presión exterior. Ocurre así que los filamentos alcanzan valores de campo cercanos a los 2000 gauss, muy superiores a los iniciales. Intensidad que se eleva cuando los filamentos se funden unos con otros para formar las manchas.

Pasado el período inicial de evolución rápida, la mancha entra en su fase de madurez y se puede tratar de modelar la estructura magnética y termodinámica resultante. Para determinar mediante observaciones los valores de las magnitudes físicas en las diferentes capas de la mancha, se aprovechan diversas propiedades de las atmósferas estelares. Así, la diferente transparencia que presenta el material solar a rayos de luz de distinta longitud de onda hace que, observando luz de diferentes colores, estemos viendo diferentes capas de la mancha. Por ejemplo, con un filtro infrarrojo centrado en una longitud de onda de 1,6 micrometros podemos ver una capa que se encuentra a





5. EL EFECTO WILSON explicado a través de distintas fotografías de una misma mancha en dos posiciones diferentes del disco solar. La primera (*arriba*) se obtuvo poco después de que la mancha comenzara a aparecer por el borde oriental del disco solar, mientras que la segunda (*abajo*) lo fue seis días más tarde, cuando la rotación del Sol la había llevado al centro del disco. Esta mancha es relativamente redonda y regular en el centro. En el borde solar, aparece en forma de elipse debido simplemente a un efecto de perspectiva. Además, y éste es el efecto de interés, la penumbra cercana aparece notablemente más estrecha que la lejana.

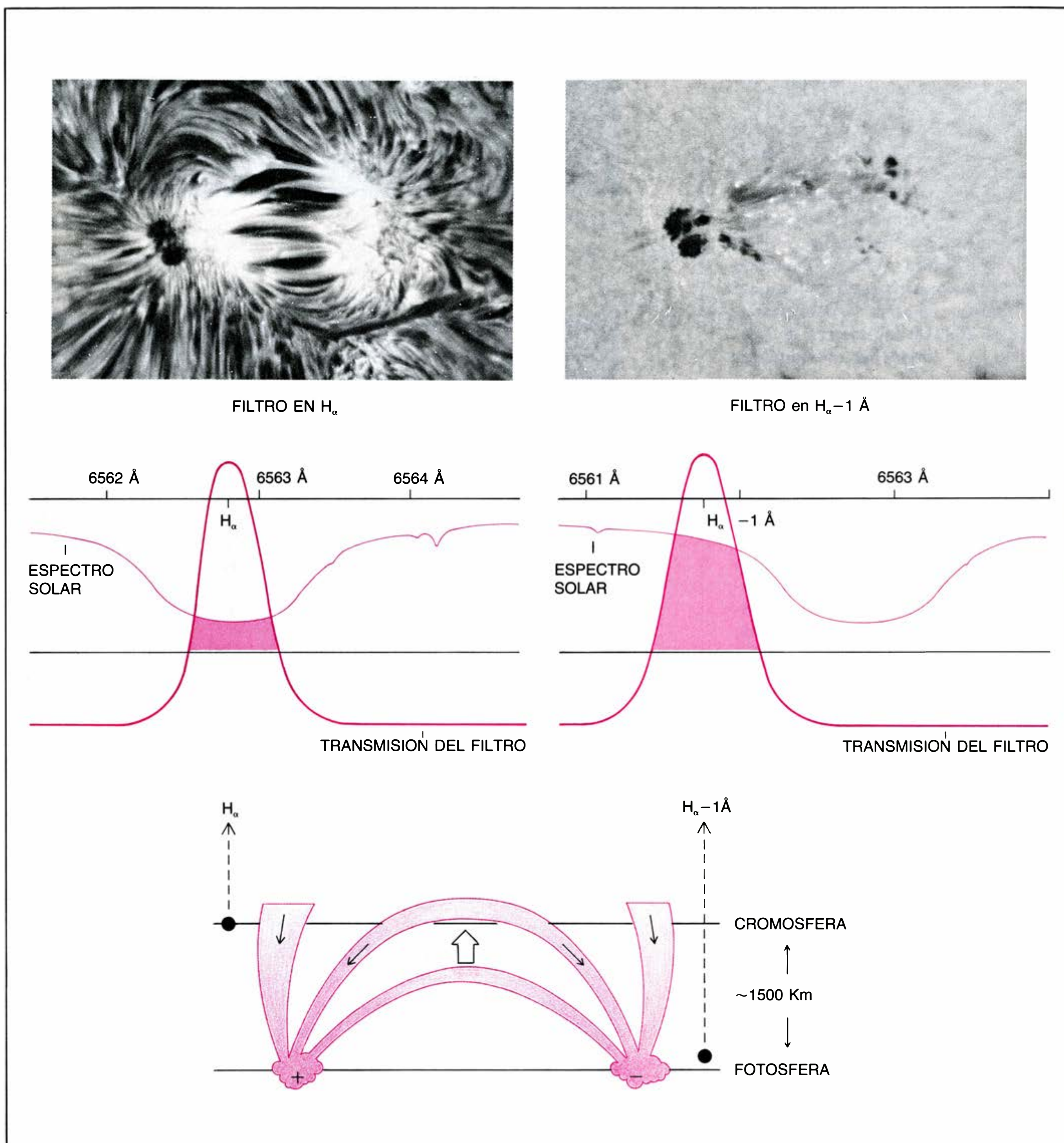
unas decenas de kilómetros por debajo de la que observamos en luz blanca. Esa es, precisamente, la capa más profunda que podemos observar directamente en la mancha. Inversamente, utilizando luz de otras longitudes de onda −verbigracia, de las líneas espectrales−, podemos observar capas por encima de la fotosfera. Existe otro método para estudiar capas a varias profundidades; en él se utiliza la luz de un color determinado y se espera que, debido a la rotación del Sol, la mancha cambie de posición en el disco solar. Para entender cómo funciona este método, notemos que la luz que proviene del borde del disco ha de atravesar oblicuamente la atmósfera solar para llegar a nosotros y, por tanto, es más absorbida en su camino que la proveniente del centro; por eso podemos ver en este último caso capas más profundas que en el primero.

Analizando, pues, la intensidad de luz procedente de distintas capas y de diferentes colores, se pueden realizar modelos "semiempíricos" de la mancha. Tales modelos no son más que una tabla de valores de diferentes cantidades físicas, como temperatura, densidad y presión de los varios componentes del gas, referidas a las diferentes profundidades visibles. Estos modelos pueden usarse como base para estudiar en detalle la física de la mancha. Por ejemplo, gracias a los primeros que se realizaron se dieron cuenta los investigadores de que la presión gaseosa era mucho menor en la mancha que en el exterior a la misma profundidad. De ahí se dedujo el papel principal que desempeña la presión magnética para mantener el equilibrio de fuerzas entre la mancha y sus alrededores. Más en general, basándose en los modelos semiempíricos se pueden calcular la intensidad del campo magnético y la configuración de sus líneas en un caso ideal en que la mancha fuera redonda y regular.

Toda la información que podemos obtener de forma directa sobre las manchas se refiere a las capas superficiales. Sin embargo, como hemos visto, existen indicios de que las regiones activas son fenómenos asentados en capas profundas del Sol. Se plantea, pues, la pregunta del origen de las manchas y su estructura por debajo de las capas visibles del Sol y, en particular, de cuáles son los procesos físicos en el interior del Sol que dan lugar a la formación de tales concentraciones gigantescas de campo magnético intenso. Se trata de cuestiones muy difíciles de responder: usando un símil del astrónomo M. Schüssler podríamos decir que el problema es tan complicado como describir la maquinaria interna de un reloj a partir tan sólo de los movimientos de las agujas en su esfera. Los aspectos básicos de la maquinaria solar, es decir, la estructura hidrostática y termodinámica de las capas profundas del Sol, es, en términos generales, bien conocida desde hace ya unas décadas; en efecto, el desarrollo de los grandes computadores ha permitido realizar modelos del interior estelar con un detalle impensable en el pasado. Puede decirse que, en muchos aspectos, conocemos hoy en día el interior solar igual o mejor que el terrestre. La estructura magnética de la maquinaria solar, por el contrario, es mucho más difícil de determinar. El motivo principal de ello reside en lo siguiente: al introducir el campo magnético en las ecuaciones físico-matemáticas que describen el interior de una estrella se complica su resolución en sumo grado; a ello se añade el hecho de que las capas de plasma magnetizado de donde proceden las manchas se encuentran en movimiento en régimen turbulento y, por tanto, son mucho más difíciles de

describir que la estructura estática de la estrella en ausencia de campo.

Hoy en día existen argumentos teóricos concluyentes que colocan el origen del campo magnético que vemos en la superficie del Sol en una zona de unos 200.000 kilómetros de profundidad por debajo de la superficie, llamada zona de convección. En esta capa, el transporte de la energía que luego vemos salir de la superficie en forma de energía radiante se realiza, básicamente, gracias a la formación de celdas convectivas, de manera similar a lo que ocurre en el aire que rodea a un radiador común en una habitación o lo que acontece en el movimiento turbulento de un líquido en ebullición. Pues bien, cuando el medio donde se está produciendo tal movimiento convectivo es un plasma magnetizado y altamente conductor de la electricidad, como el Sol, puede ocurrir, si se cumplen algunas condiciones adicionales, que el movimiento del fluido genere campo magnético o que lo mantenga a pesar de la pérdida de energía magné-



6. ANALISIS TRIDIMENSIONAL de la atmósfera por encima de una región activa, realizado por medio de observaciones en la luz de una línea de hidrógeno (Hα). Con un filtro de banda muy estrecha sintonizado en la posición de la línea de Hα, la luz recibida (oscurecida en el esquema de la izquierda) proviene de las capas situadas por encima de los 1500 kilómetros. Cambiando la longitud de onda del filtro en un angstrom, observamos capas más profundas y bastante cercanas a la fotosfera. Esta técnica hace visible (*fotografía de la izquierda*) un sistema de filamentos arqueados que unen ambos extremos de la región.

tica que se produce debido a la resistencia óhmica del medio.

La teoría que explica la generación y el mantenimiento del campo magnético solar se llama *teoría dínamo*, por analogía con las dínamos que conocemos de la Tierra, y fue desarrollada a lo largo de los años cincuenta y sesenta por varios científicos europeos y americanos. Esta teoría explica el mantenimiento del campo magnético en el Sol a partir del efecto sobre el mismo de los dos movimientos predominantes de la materia altamente conductora de la zona más externa del interior solar. Estos dos tipos de movimiento son la convección y la rotación alrededor del eje solar, que ocurre con velocidad angular diferente en las distintas latitudes y profundidades del Sol. Mucho más recientemente, al final de la última década y principios de los ochenta, se llegó a la conclusión según la cual este proceso debía ocurrir preferentemente en el fondo de la zona de convección, esto es, a 200.000 kilómetros de profundidad, en donde los movimientos convectivos tienden a concentrar el campo magnético en cuerdas o capas de elevada intensidad magnética.

La investigación de los procesos que llevan al ascenso de este campo magnético hasta la superficie se encuentra lejos de estar cerrada. Hay varias posibilidades que pueden llevar a la formación de la U invertida que asciende hasta la fotosfera; la mejor estudiada hasta ahora es el desarrollo de una inestabilidad del plasma magnetizado. Supongamos, por ejemplo, una capa magnetizada en dirección horizontal en el fondo de la zona de convección; si, debido al movimiento a su alrededor, se produce una ondulación vertical de esta capa, la materia contenida en la misma iniciará un movimiento de caída desde la parte más alta de la ondulación hacia abajo, deslizándose a lo largo de las líneas del campo. Ello hace que las partes altas de la capa ondulada se vuelvan un poco más ligeras que sus alrededores y sufran, por tanto, una fuerza de empuje adicional que les lleva a seguir ascendiendo, dando lugar a una ondulación todavía más pronunciada. Este es un ejemplo típico de inestabilidad magnética en el plasma; como consecuencia de este proceso, la parte superior de la capa magnética puede llegar hasta la superficie y crear una zona activa con sus manchas.

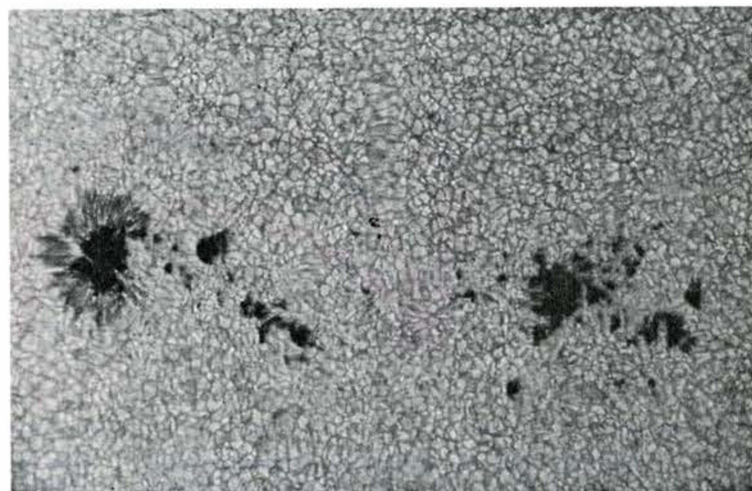
Volvamos a las capas exteriores del Sol. Cualquiera que sea el origen de las manchas en el interior solar, su estructura y propiedades físicas en la super-



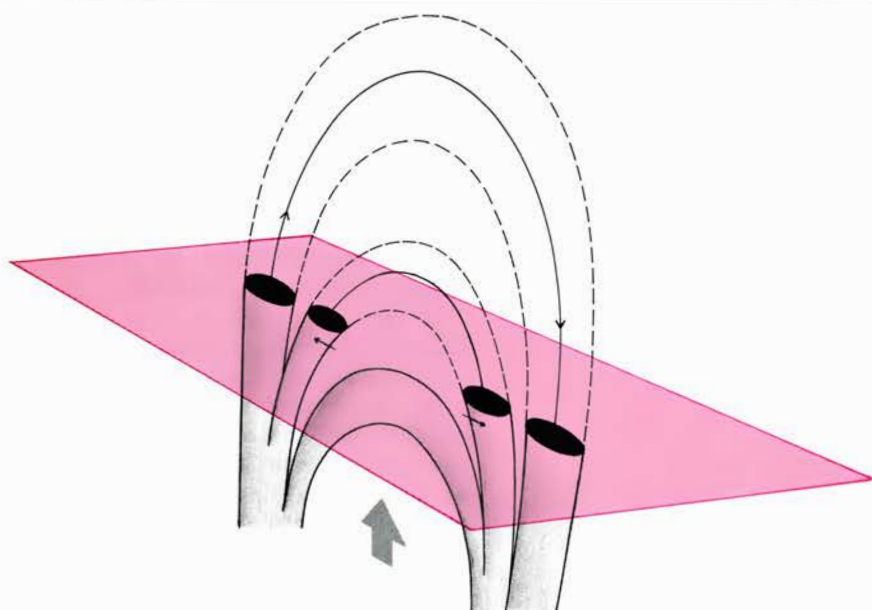
5.8.1980 10h 45m

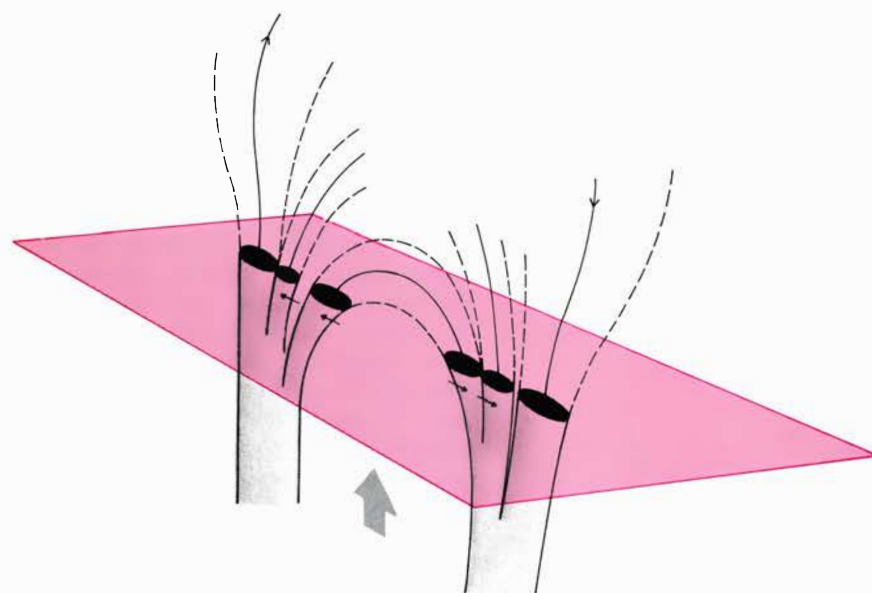


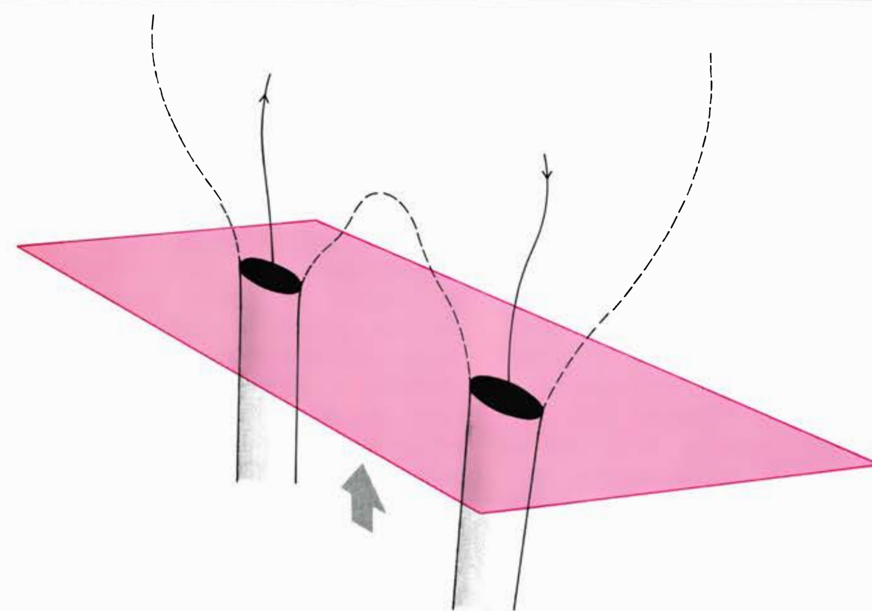
7.8.1980 12h 40m



8.8.1980 10h 55m





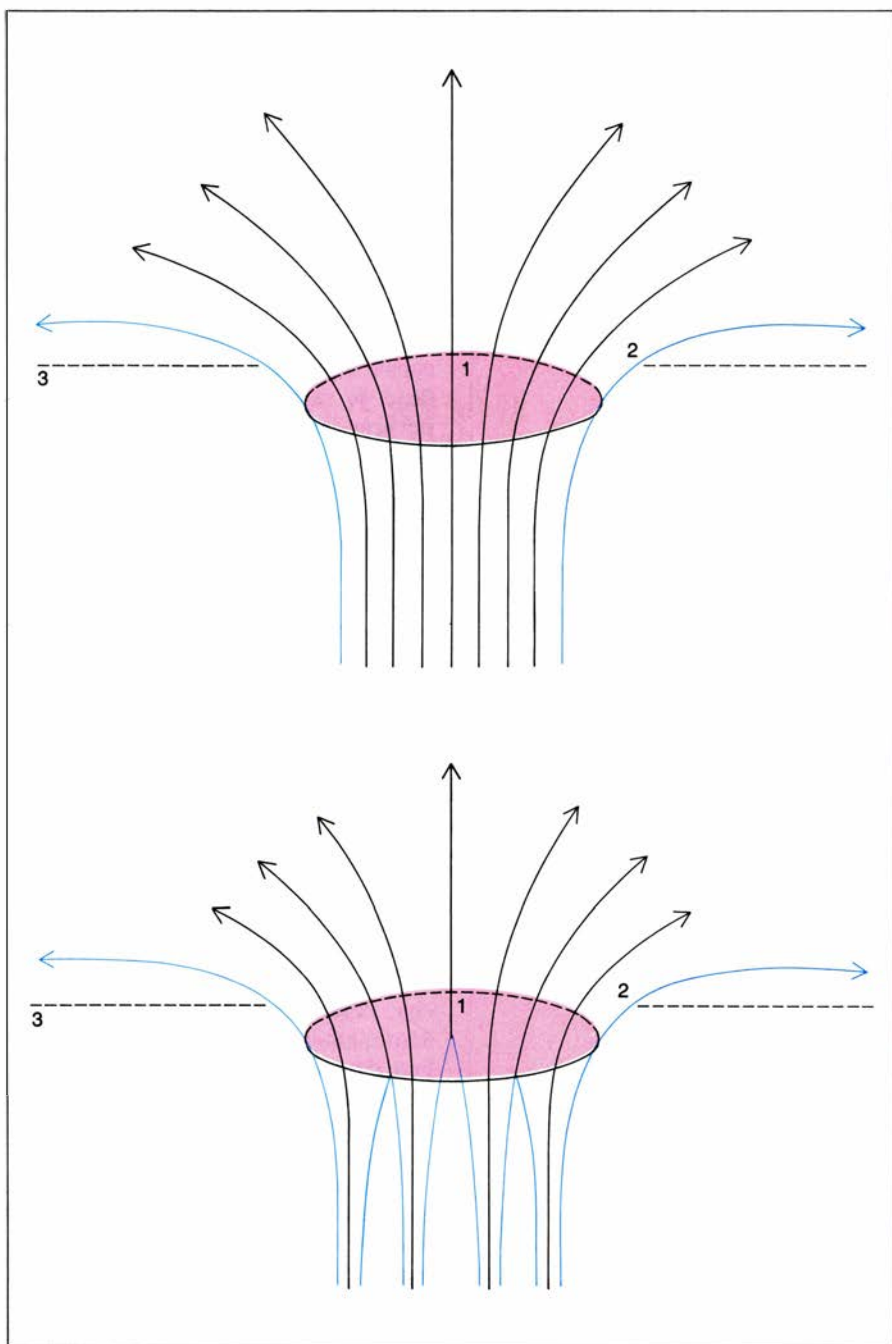


ficie plantean problemas de difícil solución. Uno de ellos es su oscuridad. Ludwig Biermann propuso ya en 1940 que la causa de la oscuridad de las manchas era su incapacidad de transportar la energía térmica con la suficiente eficacia hacia la superficie. En efecto, como acabamos de mencionar, un campo magnético de la intensidad del que poseen las manchas dificulta o impide la formación de celdas convectivas normales que transporten energía hacia las capas superficiales. Debido a ello, el flujo de radiación que sale por la superficie de la mancha alcanza sólo el 20 por ciento del flujo normal en la fotosfera no magnética que la rodea; por ello se ve más obscura. Como la energía radiada por un objeto es menor cuanto más frío esté, la única situación de equilibrio posible para la mancha es con una temperatura inferior a la de sus alrededores.

Como consecuencia del bloqueo del transporte de energía en la mancha, debería producirse una acumulación de calor en sus alrededores, sobre todo en aquellas profundidades donde la supresión de la convección empieza a influir marcadamente en el transporte de energía; en virtud de esta acumulación debería observarse un exceso de brillo en un anillo alrededor de la mancha. Pero no se observa tal anillo brillante; antes bien, mediciones recientes han detectado una disminución de la irradiancia solar coincidiendo con el paso de manchas por el disco solar.

Se está buscando una salida a este problema. Parece que la disminución en cuestión puede compensarse con el exceso de emisión procedente de los pequeños elementos magnéticos brillantes que se encuentran cerca de las manchas, llamados fáculas de la zona activa, que sobreviven a las manchas durante días o semanas. Sin embargo, tal posibilidad requeriría que el Sol fuera capaz de canalizar el exceso de energía a través de los elementos magnéticos cercanos a la mancha, lo cual no sería comprensible en el marco de las

7. EMERGENCIA DE UNA REGION ACTIVA estudiada en luz blanca desde el Observatorio del Teide (Tenerife). La primera imagen muestra la región activa, un día después de los primeros signos de la emergencia. Durante las siguientes 50 horas se observa la aparición de pequeños poros en el centro de la región que van desplazándose hacia los respectivos polos. Una vez allí, los pequeños fragmentos se integran en estructuras mayores. Un día después, el polo occidental (*izquierda*) casi ha completado su emergencia y muestra una apreciable cohesión en la umbra, así como una penumbra desarrollada. En la parte derecha de cada fotografía se ofrece el posible escenario sugerido por el trabajo observacional.



8. POSIBLES MODELOS de la estructura de las manchas por debajo de la fotosfera solar (3), en los que aparecen expresamente señaladas la umbra (1) y la penumbra (2). El modelo monolítico (*arriba*) corresponde a un tubo magnético único y compacto. En el modelo alternativo (*abajo*), numerosos tubos pequeños resultan comprimidos en una estructura aparentemente compacta. En este segundo caso, la fuerza de unión entre los pequeños tubos sería análoga a la que mantiene unido a un racimo de globos llenos de gas ligero.

ideas actuales sobre el transporte de energía en el plasma. Una solución más plausible ha sido propuesta por H. Spruit, del Instituto Max Planck. Como ha probado este investigador, los movimientos turbulentos de la zona de convección pueden evacuar el exceso de calor de alrededor de la mancha con una enorme eficacia, repartiéndolo hasta grandes distancias en esa zona y eliminando la posibilidad de formación de un anillo brillante.

Respecto de su morfología, existen dos modelos básicos de la estructura de la mancha en los primeros miles de kilómetros bajo la fotosfera. El primer modelo propone que la mancha tiene una estructura columnar monolítica hasta capas profundas de la zona de convección. El segundo modelo supone, por el contrario, que la mancha consiste en una acumulación de pequeñas fibras magnéticas, reunidas en la superficie y formando una suerte de gavilla; debajo de la superficie, sin embargo, se separan unas de otras a una profundidad de unos cientos de kilómetros. Al no poderse observar el interior solar, dichos modelos sólo pueden comprobarse estudiando su compatibilidad con las ideas actuales sobre el origen y evolución de las manchas, así como, de manera indirecta, ideando pruebas observacionales que permitan distinguir entre ambos modelos.

El que un modelo u otro resulte aceptable depende, en primer lugar, de que la estructura propuesta no sea inestable. La objeción principal contra la hipótesis de la estructura monolítica es que, por debajo de los primeros cientos de kilómetros, la columna magnética resulta inestable ante procesos de estriación; inestabilidad que llevaría a la destrucción de la mancha como estructura coherente en un breve plazo de tiempo, mucho más corto que la vida observada de la mancha. La estructura monolítica sólo sería viable si hubiera un mecanismo de estabilización de la estructura magnética.

Para aceptar un modelo debe ser éste compatible con las propiedades de las manchas observadas en la superficie. Si la mancha fuera una gavilla de fibras magnéticas, debería manifestar esa estructura en las capas visibles; se ha probado que el plasma entre las fibras magnéticas individuales debería estar sujeto a oscilaciones que lo lleven hacia la superficie. Y así, tendría que observarse, en el seno de la mancha, plasma no magnetizado en forma de puntos o líneas brillantes delineando el perímetro de las fibras magnéticas si éstas fueran suficientemente grandes: esto podría constituir un buen test observacional de este modelo de mancha. Pero la realidad es más compleja; dentro de una estructura monolítica pueden darse también oscilaciones que originen columnas ascendentes de plasma que alcancen la superficie de la mancha. El resultado sería aquí otra colección de puntos brillantes de la umbra.

Se hace, pues, necesario estudiar las irregularidades de la umbra. Mirando las imágenes que ilustran este artículo podemos advertir la presencia de estructuras brillantes en el interior de las manchas: se distinguen bandas luminosas que cruzan la umbra, llamadas *puentes de luz*, y puntos brillantes, los *puntos umbrales*. El brillo de ambas estructuras es muy parecido al de la fotosfera exterior de la mancha.

Los puentes de luz aparecen casi siempre asociados a las fases de for-

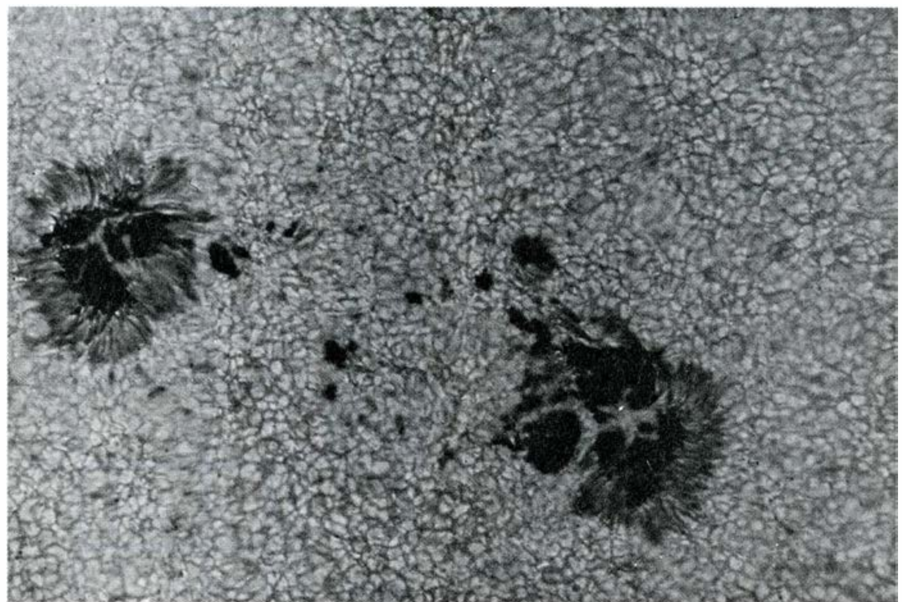
mación y desintegración de las manchas. Muchas veces pueden verse en ellos gránulos similares a los de la fotosfera no magnética. Los puentes de luz son objetos fáciles de ver por su gran tamaño y brillo; los puntos umbrales, por el contrario, aunque se aprecian con relativa facilidad, no pueden estudiarse con los medios actuales de observación. El diámetro de estos últimos es de unos 200 kilómetros. (El tamaño de las estructuras más pequeñas que pueden distinguirse en un buen análisis espectroscópico se cifra en 700 kilómetros.) Su tiempo de vida es de media hora. De acuerdo con las observaciones más recientes, el campo magnético en estos puntos brillantes podría ser entre 500 y 1000 gauss menor que el campo medio de la umbra; la materia en ellos tiene una velocidad ascendente. Sin embargo, existe una gran incertidumbre sobre el valor preciso de todas estas magnitudes físicas de los puntos umbrales.

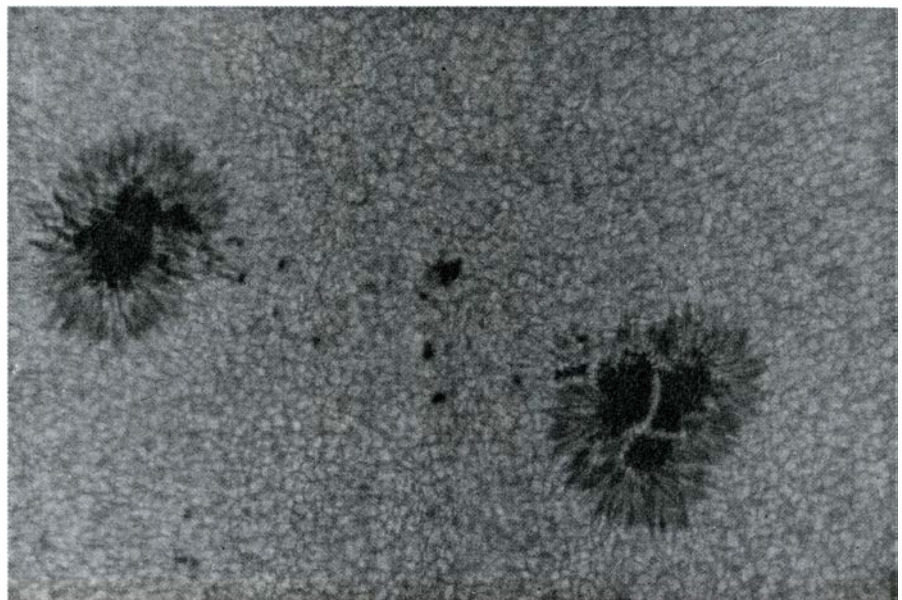
De forma análoga, la penumbra presenta una compleja estructura filamentosa, con alternancia de filamentos brillantes y obscuros, cuya anchura es, con frecuencia, menor de lo que permiten resolver los instrumentos de observación actuales. La distribución de brillo en los filamentos recuerda la de un cometa: un núcleo luminoso en el lado más cercano a la umbra, seguido de una cola de brillo decreciente hacia el exterior. Otra característica de la penumbra es la existencia de un flujo de materia de alta velocidad, mayor de dos kilómetros por segundo, conocido por flujo de Evershed, dirigido a lo largo de los filamentos penumbrales hacia el exterior de la mancha.

La estructura fina de la mancha constituye un ejemplo típico de objeto de investigación en el que el avance en el pasado se vio limitado por la falta de medios observacionales adecuados. Para progresar en ese dominio se requieren una refinada instrumentación y una óptima ubicación del lugar de observación. Conscientes de ello, los astrofísicos solares europeos crearon en el año 1969 la organización internacional JOSO (Joint Organization for Solar Observation) para buscar los mejores sitios donde instalar sus instrumentos de observación. Se llegó a la conclusión de que las cumbres de las islas más altas del archipiélago canario, Tenerife y La Palma, eran las más idóneas. Hay allí hoy, terminados o en fase de construcción, seis telescopios solares de diferentes instituciones europeas.

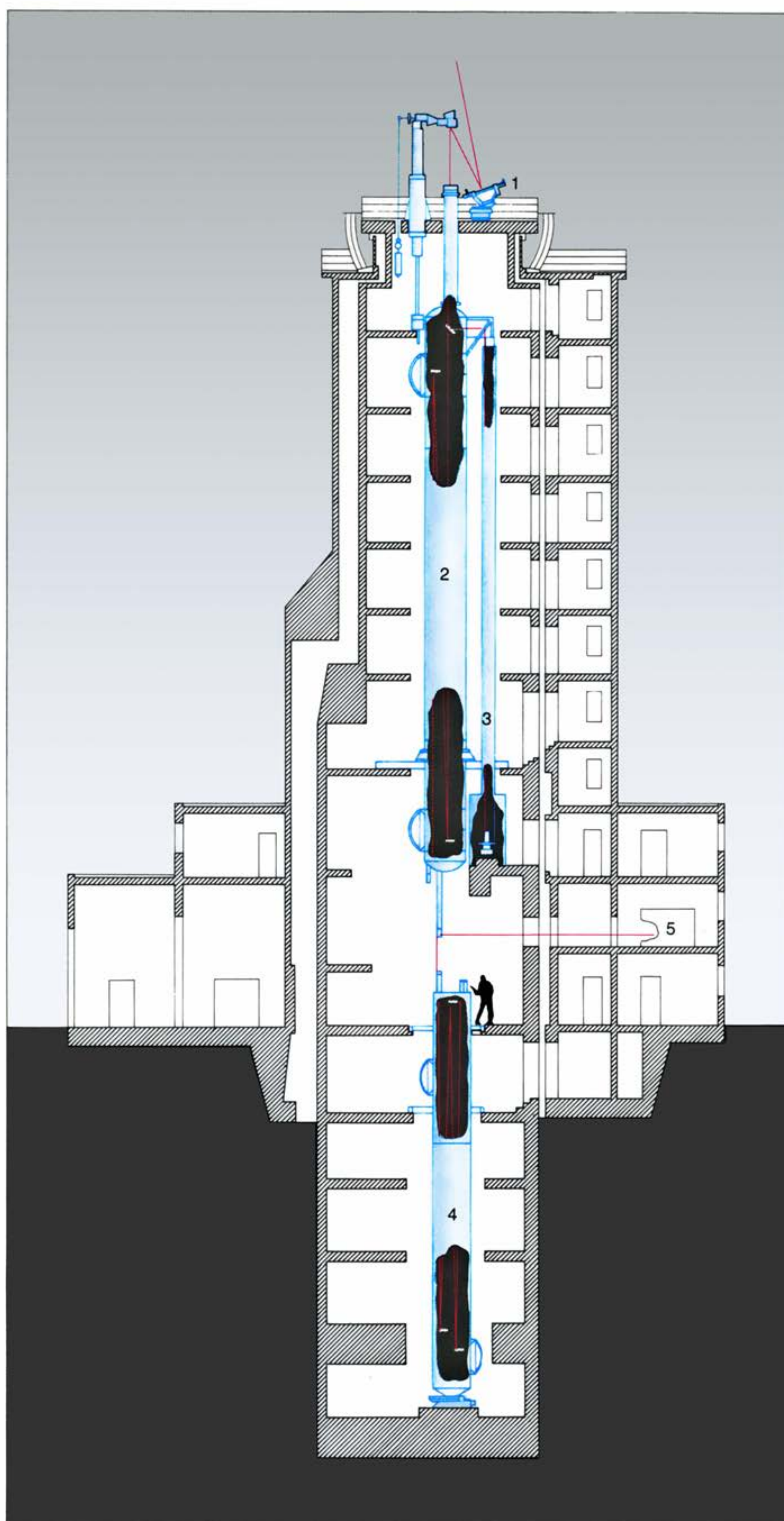
En nuestras observaciones de alta resolución espacial, llevadas a cabo en el Instituto Astrofísico de Canarias, se han detectado indicios claros de que las manchas con frecuencia son estructuras compuestas por dos o varios fragmentos separados por alineamientos de puntos umbrales. En muchos de estos casos, los fragmentos no llegan a fusionarse por completo en ningún momento y la mancha comienza a desintegrarse precisamente a partir de la separación de ellos. No se sabe si esta estructura es una característica básica de la mancha o si se trata de un caso excepcional; si fuera lo primero, habría que intentar correlacionar esa estructura con el modelo multitubo de la mancha mencionado más arriba.

El Sol es una estrella peculiar sólo porque está cerca de nosotros. Por lo demás, pensamos que puede haber muchos miles de millones de estrellas en nuestra galaxia similares a él. Hasta hace poco no existía confirmación de esta similitud por lo que respecta a la actividad magnética o, de forma más elemental, a la presencia de zonas obscuras en su superficie. Hoy, sin embargo, poseemos pruebas de la presencia de ambos fenómenos en estrellas de diversos tipos. De forma indirecta, por





9. ESTRUCTURA FINA de las manchas puesta de manifiesto mediante observaciones de alta resolución, que permiten distinguir detalles de hasta 200 kilómetros. En la umbra aparecen numerosos puntos brillantes: puntos umbrales, o estrechos canales brillantes de aspecto granular: puentes de luz. Las imágenes, separadas por un intervalo de unas 26 horas, muestran cómo los fragmentos que forman las manchas, aunque cambian su morfología y posición, salvaguardan su identidad, sin llegar a "fundirse" en estructuras mayores.



10. EN EL OBSERVATORIO DEL TEIDE, en la isla de Tenerife donde se concentran múltiples instrumentos de observación solar, destaca el Telescopio-Torre al Vacío de 60 centímetros de apertura, perteneciente al Kiepenheuer Institut de la República Federal Alemana. El interior de la torre hace la función de telescopio fijo (*2*) que recibe la luz captada por un celostato (*1*). Alcanzando una profundidad de 16 m, se encuentra un espectrógrafo vertical de alta dispersión (12,5 milímetros por angstrom) (*4*), que permitirá el estudio detallado de las líneas del espectro solar. Asimismo se muestran el telescopio de seguimiento (*3*) y los laboratorios (*5*) que, alimentados por el telescopio principal, permiten el uso de instrumentos alternativos.

ejemplo, se han observado anomalías en las curvas de luz de ciertos sistemas de 2 estrellas a los que se ha dado el nombre de sistemas "tipo RS Canum Venaticorum", cuya interpretación más simple es que sean debidas a grandes zonas oscuras en la superficie de una de las estrellas componentes. Existen también métodos indirectos para estudiar zonas magnéticas en estrellas, tal como el estudio de una línea determinada del calcio ionizado, que presenta rasgos especiales cuando se forma encima de zonas activas. De este modo, se ha llegado incluso a descubrir en muchas estrellas ciclos de actividad parecidos al ciclo solar. Más aún, en nuestra década se han desarrollado métodos que permiten determinar, directa y simultáneamente, el campo magnético intenso de la superficie de algunas estrellas activas cercanas al Sol e incluso la fracción del disco estelar que está ocupada por dicho campo. Por ejemplo, en la estrella ξ de la constelación del Boyero se ha medido un campo de 2500 gauss en un 20 a un 45 por ciento de su superficie.

Con el desarrollo de los diferentes métodos para detectar, de forma directa o indirecta, la actividad magnética estelar se ha inaugurado una nueva línea de investigación que constituye un puente entre la astrofísica solar y estelar y cuyo desarrollo ha sido espectacular en los últimos años. Se espera ahora avanzar en la teoría de los campos magnéticos estelares; en particular, se confía en determinar el tamaño y aspecto de las manchas en distintos tipos de estrellas, su origen y su influencia en la evolución estelar. El desarrollo de la teoría de los interiores estelares y de su evolución permitió entender mejor que el Sol no era una estrella destacada en el Universo. Con los avances de la astrofísica de estrellas activas esperamos poder colocar al Sol, también por lo que respecta a sus manchas, en el lugar que le corresponde entre las estrellas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SUNSPOTS. R. J. Bray y R. E. Loughhead. Dover Publications, Inc. 1979.

THE PHYSICS OF SUNSPOTS, dirigido por L. E. Gram y J. H. Thomas Sacramento Peak Observatory, 1981.

SOLAR MAGNETO-HYDRODYNAMICS. E. R. Priest. D. Reidel Publishing Company, 1982.

THE EMERGENCE OF MAGNETIC FLUX. C. Zwaan en *Solar Physics*. Vol. 100, págs. 397-414; octubre de 1985.

En busca del antioncogén

La herencia de ciertos genes supresores del crecimiento, en una forma mutada, nos deja expuestos al cáncer. El primer gen que se ha aislado predispone al padecimiento de retinoblastomas

Robert A. Weinberg

Las raíces del cáncer se encuentran en nuestros genes. A menudo, el cáncer se inicia cuando un agente carcinógeno —una radiación o un producto químico— daña el ADN de un gen de importancia crítica de una célula. La célula mutada se multiplica y sus descendientes acaban formando un agregado de células, un tumor.

Este esquema general ha ganado nitidez y precisión durante la última década, al identificarse algunos de los blancos genéticos de los carcinógenos: los oncogenes. Tras ser activado por una mutación, el oncogén desencadena una proliferación celular excesiva o inadecuada; su activación constituye un paso decisivo en la aparición de muchos tipos de proliferación cancerosa.

Durante los últimos años, se ha descubierto una clase muy distinta de genes cancerosos. En las células normales no promueven la proliferación, sino que la suprimen. La pérdida de genes supresores del crecimiento elimina un freno normal de la proliferación celular; afectadas de esa carencia genética, las células quizá se multipliquen de manera incontrolada, lo que puede también conducir al cáncer. El descubrimiento de los genes supresores del crecimiento enriquece la interpretación de la genética del cáncer y, en su momento, obligará a replantearse las hipótesis sobre cómo regulan su proliferación las células normales.

El conocimiento de los genes supresores del crecimiento debe apoyarse en el de sus imágenes especulares, a saber: los oncogenes promotores del crecimiento. Cuando se insertan en células normales oncogenes aislados de tumores, aquéllas adquieren muchos de los rasgos característicos de las células cancerosas [véase "Base molecular del cáncer", por Robert A. Weinberg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1984]. Tales experimentos de transferencia génica han mostrado que los oncogenes actúan desregulando el crecimiento de las células en las que se introducen, por lo que cabe achacarles al menos parte de la conducta aberrante de las células tumorales de las que se tomaron. Varias líneas de investigación han revelado que esos oncogenes son versiones alteradas de genes normales, los protooncogenes, que actúan como reguladores centrales del crecimiento en las células normales. A lo largo de toda la vida, una amplia gama de mutaciones puede transformar genes normales en oncogenes malignos.

Para la génesis de un tumor puede ser necesaria la aparición de un oncogén al menos, pero dista mucho de ser suficiente. La oncogénesis es un proceso con múltiples etapas. La evolución de una línea de células tumorales parece depender, como mínimo, de la acumulación de mutaciones que alteran varios genes, entre ellos oncogenes, que actúan luego de manera concertada y fomentan el crecimiento maligno en toda su complejidad.

Sin embargo, hasta la fecha sólo se han detectado oncogenes en el 15 o 20 por ciento de los tumores humanos. Puede que las células tumorales humanas porten, activados, otros oncogenes promotores del crecimiento, que no se han descubierto por la sencilla razón de que los métodos al uso no son suficientemente sensibles para detectarlos. Sin embargo, cabría también que no se hubiera identificado otros genes cancerosos porque su manera de actuar se basara en principios muy distintos. Por ejemplo, si la aparición de algunos tumores obedece a la pérdida de genes supresores del crecimiento, la infuencia de estos genes sólo se percibiría en su ausencia.

Otro principio básico distingue los oncogenes de los genes supresores del crecimiento. Sin excepción, los oncogenes estudiados hasta ahora son activados por mutaciones somáticas: cambios genéticos que ocurren en algún órgano y no en las células germinales (espermatozoides u óvulos). Por consiguiente, los genes activados mutantes no se transmiten de padres a hijos. Por el contrario, sí se encuentran en las células germinales las formas mutantes de los genes supresores del crecimiento, que pueden transmitirse entonces de una generación a otra. Quien adquiera en su concepción un gen mutante supresor del crecimiento, presentará de por vida un riesgo mayor de cáncer.

Los estudios sobre el retinoblastoma, un tumor del ojo, han abierto una ventana de luz que ilumina la operación de los genes supresores del crecimiento. Se trata de un tumor poco frecuente (afecta aproximadamente a uno de cada 20.000 infantes), pero sirve de modelo para otros muchos tipos de cáncer con los que no guarda relación alguna. Gracias al conocimiento del gen que lo produce podemos encajar ya varias piezas del rompecabezas genético que es la causa del cáncer.

Los retinoblastos son los precursores de las células de la retina, la capa fotosensible situada en la parte posterior del ojo; según parece, las células que forman los retinoblastomas son las que ordinariamente acaban convirtiéndose en conos, un tipo de células fotorreceptoras. Cuando el retinoblasto se ha diferenciado y se ha transformado en célula especializada de la retina, cesan sus divisiones y deja de constituir una diana para la tumorigénesis. Ello parece estar relacionado con la distri-

ROBERT A. WEINBERG, del Instituto Whitehead de Investigación Biomédica, enseña biología en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), por el que se licenció (1964) y doctoró (1969). Tras investigar en el Instituto Weizmann de Ciencias y en el Instituto Salk de Estudios Biológicos, regresó al MIT en 1972, incorporándose en 1983 al Whitehead. Este es el tercer artículo que Weinberg redacta para INVESTIGACIÓN Y CIENCIA.

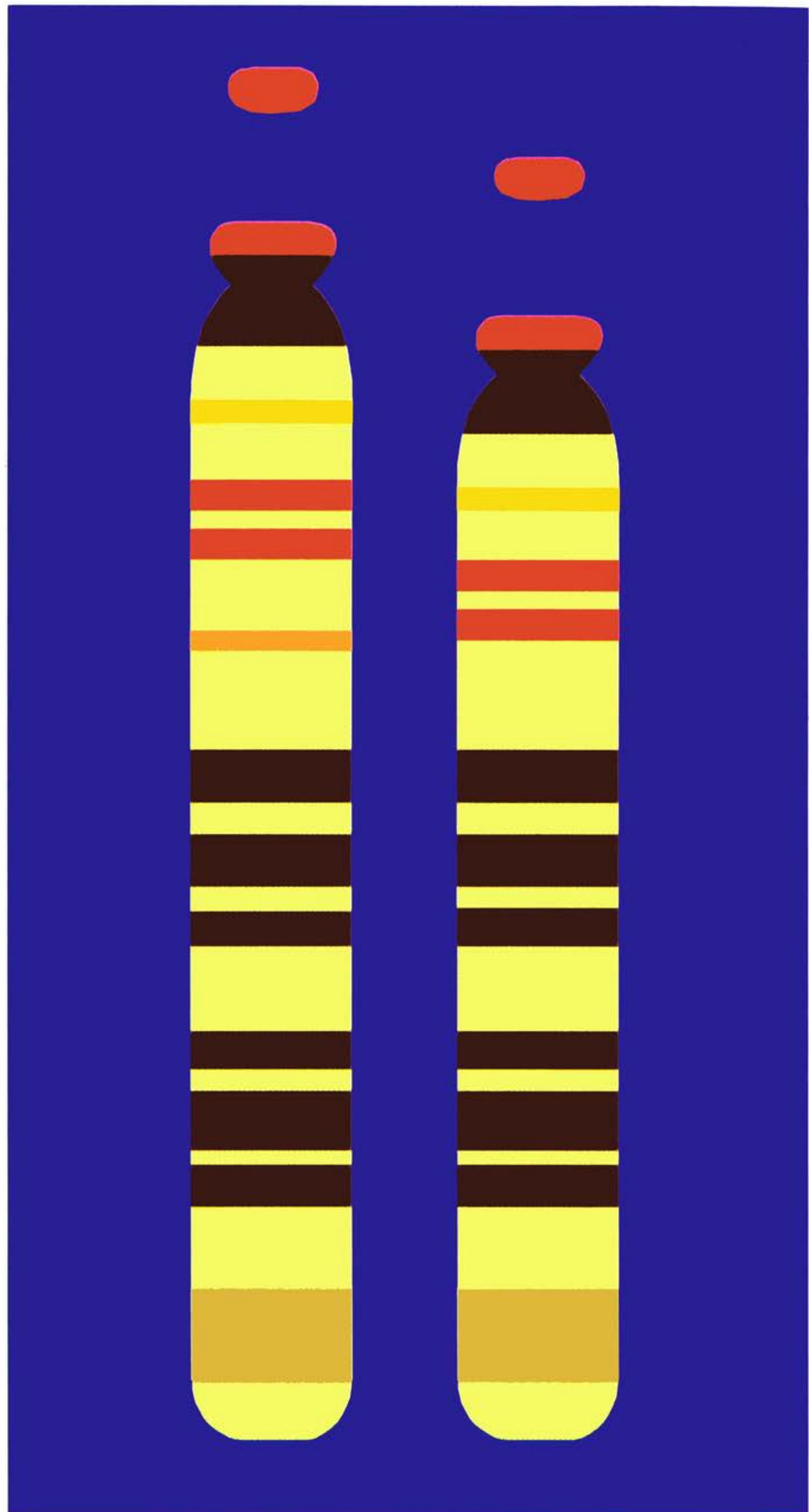
bución de los retinoblastomas en función de la edad: no se encuentran en niños de más edad o en adultos.

Hasta la mitad del siglo XIX la aparición del retinoblastoma anunciaba el curso irremediable de una enfermedad fatal. El cerebro sufría una rápida invasión tumoral y el niño moría. En 1850 Hermann von Helmholtz inventó el oftalmoscopio, con el que podía observarse el interior del globo ocular y detectarse el tumor mucho antes de que se expandiese e invadiera los tejidos adyacentes. El diagnóstico precoz posibilitó la curación (por extracción quirúrgica del globo ocular afectado) y afloraron entonces los primeros casos de retinoblastosis "familiar": muchos pacientes sobrevivían hasta la madurez y tenían hijos, la mitad de los cuales, aproximadamente, padecerían el tumor, por otra parte bastante infrecuente. El retinoblastoma persistió también en su forma histórica "esporádica", que afecta a niños cuyas familias no tienen antecedentes de la enfermedad.

A mediados de este siglo se reconoció que los dos tipos de retinoblastoma constituían manifestaciones distintas de la misma enfermedad. Para los genéticos, representaban un fenómeno fascinante. La forma familiar de la enfermedad dependía claramente de la transmisión de un gen de padres a hijos, aunque se ignoraba de qué forma podían estar implicados los genes en el desencadenamiento de la enfermedad esporádica. De confirmarse la participación de los genes, ¿eran los mismos o había implicados genes distintos en una y otra forma de la enfermedad?

En 1971, Alfred G. Knudson, Jr., del Instituto de Investigaciones sobre el Cáncer de Philadelphia, propuso una sencilla explicación genética para ese fenómeno aparentemente complejo. Su hipótesis reconocía las dos posibles procedencias de los genes mutados a que se ha aludido antes: por herencia de un progenitor o por mutaciones somáticas que afectan accidentalmente los tejidos a lo largo de la vida. Proponía, asimismo, que los orígenes de ambos tipos de retinoblastoma podrían relacionarse con cambios en el mismo conjunto de genes.

Después de estudiar la incidencia de la enfermedad en niños pequeños, Knudson concluyó que las células tumorales no portaban un gen mutante, sino dos. En el retinoblastoma familiar, argüía, la primera mutación afectaba algún gen crítico desde el momento mismo de la concepción, por lo que se diseminaba a todas las células del cuer-



1. SITIO DEL CROMOSOMA 13 relacionado con el retinoblastoma por Jorge J. Yunis, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Minnesota. Cuando teñía cromosomas de retinoblastomas, para poner de manifiesto sus bandas, observaba a menudo la falta de un segmento del brazo largo del cromosoma 13. La imagen de ordenador, obtenida por el propio Yunis, permite comparar un cromosoma 13 normal (*izquierda*) con el primer ejemplar anormal que citó (*véase la figura 2*). En la versión aberrante aparece suprimida parte de una banda clara (que engloba la sub-banda naranja) que en el cromosoma normal se encuentra cerca del extremo superior. (Las formas ovaladas de la parte alta representan telómeros, los extremos de los cromosomas, que en las micrografías parece que se han desprendido del resto del cromosoma.)

po, incluidas las de la retina. El gen mutado, que nos deja proclives al tumor, procedería de un progenitor afectado por la enfermedad o de algún accidente genético ocurrido durante la formación del espermatozoide o del óvulo en los progenitores. La segunda mutación se produciría luego, de forma somática y por tanto localmente, en alguna de las numerosas células de la retina que ya portaban la mutación adquirida congénitamente. En el caso del retinoblastoma esporádico, no familiar, proponía Knudson, ambas mutaciones se producirían somáticamente y de manera local en una sola célula de la retina, cuyos descendientes proliferarían luego en un tumor.

Sabemos ya que, en sus líneas generales, la formulación de Knudson era correcta. En aquel entonces compendiaba cuanto se sabía del retinoblastoma, pero dejaba dos cuestiones importantes sin resolver. En primer lugar, ¿cuál era la naturaleza del gen o genes mutados que se adquirían del progenitor o que alteraban mutaciones somáticas? ¿Participaba un solo gen o varios? En segundo lugar, ¿qué clases de mutaciones serían capaces de crear alelos (versiones de gen) cancerígenos? ¿Se trataba acaso de mutaciones que hiperactivaban un protooncogén y lo transformaban en oncogén? O, por el contrario, ¿inactivaban el gen y hacían desaparecer su función?

Los datos fundamentales para resolver el rompecabezas surgieron del examen microscópico de los cromosomas presentes en las células normales y en las del retinoblastoma. Los cromosomas se observan con especial nitidez cuando se logra atrapar las células en los primeros estadios de la división celular. Un buen microscopista discierne incluso la estructura detallada del cromosoma por la presencia de bandas, que ocupan posiciones características a lo largo del cromosoma.

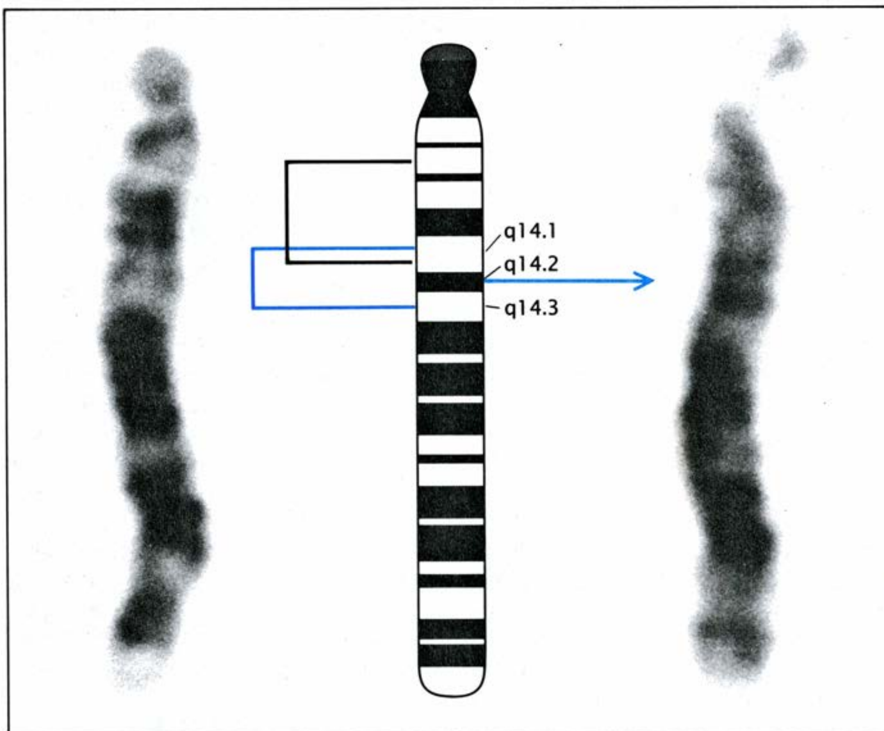
A menudo, los cromosomas de las células tumorales y los de las células humanas normales presentan morfologías distintas. Las discrepancias pueden ser mero reflejo del caos genético que se acumula en las células tumorales durante su tortuosa evolución desde el estado normal hasta el de malignidad. Pero los microscopistas identifican a veces cambios cromosómicos específicos que se dan de modo reproducible en muchos tumores de un tipo determinado.

Así ocurrió cuando Jorge J. Yunis, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Minnesota, estudió células de varios retinoblastomas. El más largo de los dos brazos (el brazo q) del cromosoma número 13 mostraba con frecuencia una deleción; solía faltar alguna de las bandas que de ordinario aparecen en ese cromosoma. Lo común era que faltase parte de la banda 14. La asociación de las alteraciones 13q14 con el retinoblastoma era demasiado frecuente para atribuirla a meros accidentes genéticos estocásticos; antes bien, parecía que la deleción confería algún tipo de ventaja proliferativa a las células que engendraban el tumor.

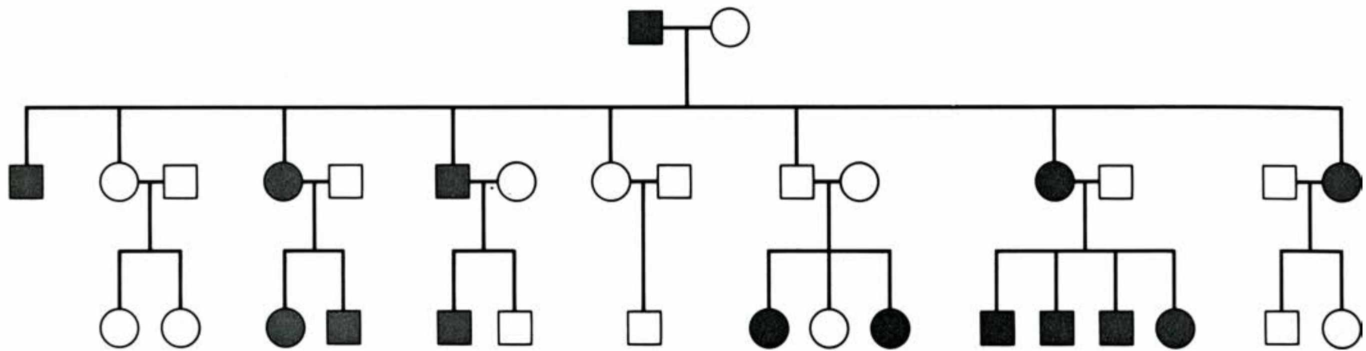
Esos datos constituyeron el inicio de una respuesta a los rompecabezas de Knudson: uno de los acontecimientos mutagénicos asociados a la retinoblastosis era una deleción que podía provocar la pérdida total de un gen y, por tanto, de alguna función crucial. Posteriores análisis de los cromosomas evidenciaron que, en algunos niños afectados de retinoblastoma familiar, las deleciones del cromosoma 13 no sólo se encontraban en las células tumorales, sino en todas las células normales del organismo, así como en las de uno de sus progenitores. Por contra, las deleciones que se presentaban en los casos esporádicos aparecían invariablemente confinadas a las células tumorales. Con otras palabras, los cromosomas dañados se hallaban en las células que Knudson había predicho que portarían los genes mutantes responsables de las dos formas de retinoblastoma.

El gen del cromosoma 13 ostensiblemente implicado en el desencadenamiento de esos tumores se denominó *Rb*. Se había identificado por la presencia de una deleción, tan grande que resultaba visible al microscopio, lo que en el nivel molecular supone la pérdida de un segmento de ADN de varios cientos de miles de las bases que constituyen las cadenas de material genético. Sin embargo, tamaña lesión cromosómica representaba sólo uno de los diversos mecanismos mutagénicos en cuya virtud podría inactivarse el gen *Rb*. Deleciones mucho menores, sin efecto sobre la estructura visible al microscopio, podrían anular con pareja eficacia la función del gen. De hecho, algunos trabajos recientes han mostrado que basta incluso con cambios que afectan a una sola base de ADN (mutaciones puntuales).

Llegados aquí, uno de los dos genes efectores se había asociado a un sitio específico del cromosoma 13, pero todavía se desconocía la identidad del



2. MICROFOTOGRAFIAS del cromosoma 13 normal y anormal, obtenida por Jorge J. Yunis, que aquí flanquean un diagrama del cromosoma normal. El corchete azul señala en el esquema la deleción que ha sufrido el cromosoma aberrante (*derecha*). El corchete negro enmarca la deleción observada en un cromosoma de un retinoblastoma distinto. Las dos deleciones se solapan y delimitan el sitio que ocuparía un supuesto gen del retinoblastoma en una pequeña región de la sub-banda 13q14.1, próxima a la sub-banda 13q14.2; q designa el brazo largo del cromosoma. (El cromosoma 13 tiene un brazo corto diminuto: es el segmento situado por encima de la constricción próxima al extremo superior del cromosoma.)



3. ARBOL GENEALOGICO de una familia con retinoblastoma hereditario que publicaron Thaddeus P. Dryja y sus colaboradores. Los miembros afectados se indican con círculos oscuros (mujeres) o cuadrados oscuros (hombres). En la segunda generación, cinco hijos desarrollaron el tumor. Un hijo que no resultó afectado heredó el cromosoma 13 mutado y dos de sus hijas padecieron el mal. Hasta la mitad del siglo XIX, el retinoblastoma constituía una enfermedad fatal.

otro. Podía ser un gen distinto, situado en uno cualquiera de los 23 cromosomas de la célula; todos éstos, salvo dos, se encuentran por duplicado. La segunda diana de la mutación podía ser la otra copia del gen del cromosoma 13 inicialmente afectado, que permanecía en el cromosoma 13 intacto.

Mediante el recurso a un hábil truco genético, disponíase ya en 1983 de datos que sugerían la presencia de la segunda diana genética de la mutación en el segundo cromosoma 13. La sugerencia se corroboró a través de un análisis genético indirecto: siguiendo el destino de otro gen, situado también en el cromosoma 13 y muy cerca del gen *Rb*. Siguiéndole la pista a ese tipo de "marcadores" podemos a menudo predecir el destino que espera a genes vecinos estrechamente ligados, aunque invisibles. Robert S. Sparkes, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en Los Angeles, identificó el marcador: el gen que determina la enzima esterasa *D*. Rosalind Godbout, Brenda Gallie y Robert A. Phillips, del Hospital Infantil de Toronto, encontraron que, en algunos pacientes de retinoblastoma, las células normales presentaban dos versiones del gen de la esterasa *D*, una en cada cromosoma 13. Sin embargo, las células tumorales solían albergar dos copias iguales del gen marcador de la esterasa *D*. Uno de los dos alelos (versiones) se había perdido y había sido remplazado por una copia del otro.

El gen de la esterasa *D* no guardaba ninguna relación con el retinoblastoma, pero su estrecha vecindad con el gen *Rb* facilitó el seguimiento de éste. Si se perdía una de las dos versiones del gen de la enzima, y se sustituía por la superviviente, se le atribuía el mismo destino al vecino gen *Rb*. Veíase entonces que las células retinianas que portaban inicialmente una versión normal y otra mutada del gen *Rb* podrían acabar a veces con dos copias mutadas del gen. Un análisis más detallado confirmó tal posibilidad: se observó que, con frecuencia, en las células tumorales había dos copias del gen *Rb* defectuoso. El hallazgo proporcionó la clave fundamental del segundo paso de la tumorigénesis: la pérdida de la copia intacta y superviviente del gen *Rb*.

Se estaba ya en condiciones de reformular la teoría de Knudson. En las dos fases requeridas para desencadenar el cáncer están implicadas las dos copias del gen *Rb*. En cada una se inactiva una copia del gen, creándose un alelo inactivo, "nulo". En los niños que nacen con una copia intacta del gen *Rb* y otra defectuosa se desencadenará el cáncer si pierden la copia buena por mutación somática de alguna célula retiniana. Otros, aun habiendo nacido con dos copias buenas, pueden perder ambas en algún episodio desafortunado, y raro, que afecte a una célula de la retina en los estadios tempranos de la vida, lo que conduciría al mismo resultado final.

Los niños que portan un gen *Rb* mutante adquirido de forma congénita son normales en todo, salvo en su riesgo, mucho mayor, de padecer cáncer. La inmensa mayoría de las células de su cuerpo sólo posee una copia del gen, pero su desarrollo fetal no se resiente de ello. El único alelo *Rb* normal basta para cumplir la función del gen en la programación del desarrollo normal; el alelo *Rb* defectuoso que se encuentra en todas las células no perturba de forma activa el proceso. Con otras palabras, la mutación es "recesiva": sólo se manifiesta cuando la copia intacta superviviente del gen (que "domina" en el nivel celular) se pierde en alguna de las células retinianas.

Si la inactivación de un gen como *Rb* desencadena el crecimiento descontrolado del cáncer, síguese que, en su encarnación normal, el gen debe restringir la proliferación celular. Ello implica la existencia de una clase de genes dedicados a la regulación negativa de la proliferación normal, que yo prefiero denominar genes supresores del crecimiento. Dado que la pérdida de estos genes puede conducir a la proliferación maligna y puesto que muchos oncogenes actúan de una manera diametralmente opuesta —es decir, promoviendo el crecimiento maligno—, los genes del tipo de *Rb* se han denominado antioncogenes, o genes supresores de tumores. Aunque es probable que esos términos se afiancen, no por ello dejan de ser imprecisos. La función normal del gen *Rb* consiste en suprimir el crecimiento en general; cualquier implicación en el cáncer es ocasional y no intencionada.

Impreciso o no, el término antioncogén posee cierta base lógica. Los genes de la clase de *Rb*, intactos, funcionan oponiéndose a la acción de un oncogén. Por la misma razón, la célula cancerosa, que adquiere ventaja proliferativa desarrollando oncogenes que instan el crecimiento celular, puede incrementar su capacidad de multiplicación deshaciéndose de los genes que hasta ese momento limitaban su crecimiento. Ese podría constituir, en efecto, un mecanismo cancerígeno especialmente frecuente, pues resulta mucho más fácil eliminar un gen de un golpe que hiperactivar otro a través de una sutil artesanía de mutaciones.

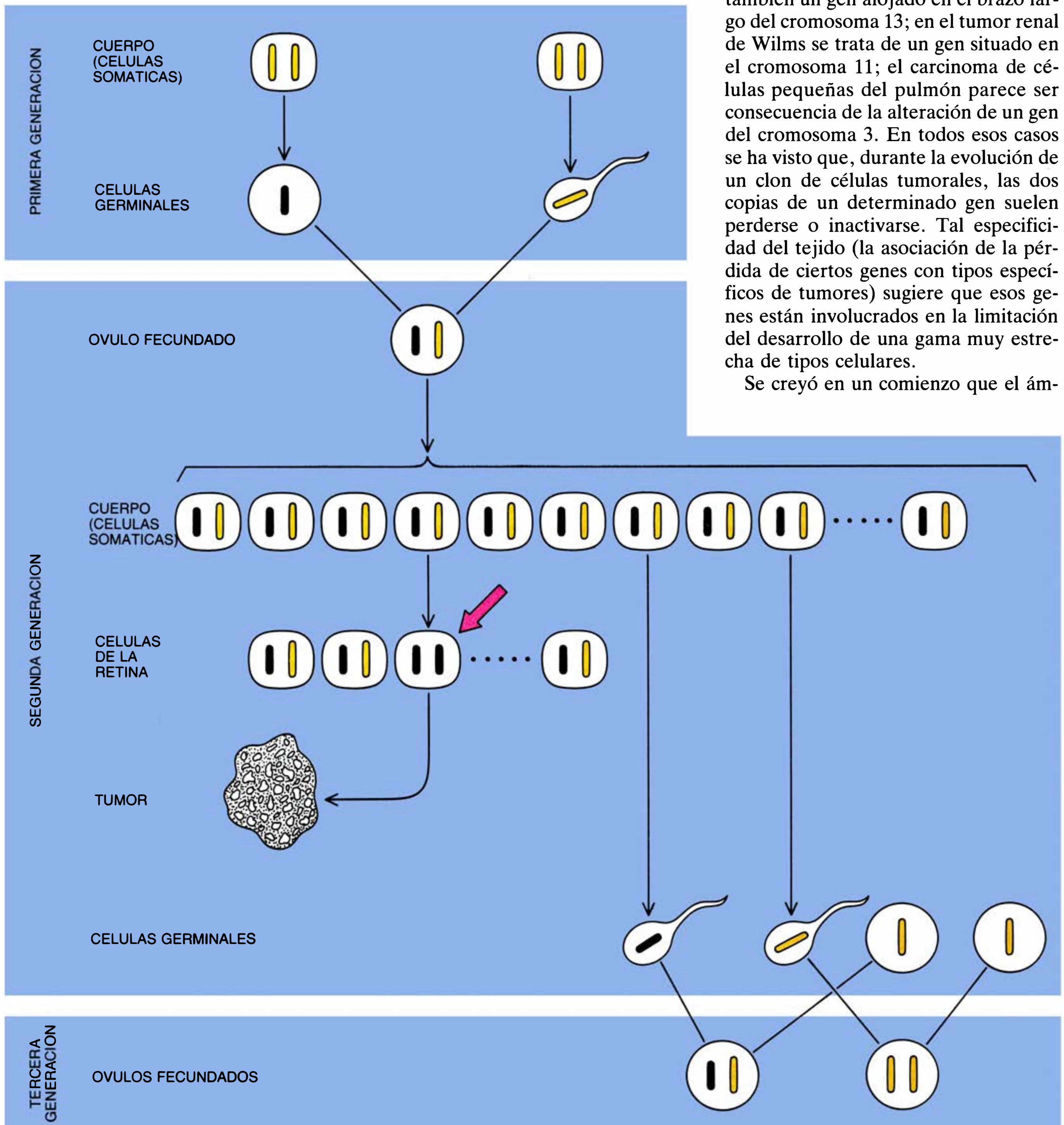
La pérdida de antioncogenes podría constituir un fenómeno bastante común en el desarrollo del cáncer. El examen de los cromosomas de varios tipos de tumores revela a menudo la presencia de aberraciones cromosómicas características. Se trata, unas veces,

de la pérdida de segmentos específicos del cromosoma; en otras, sin embargo, hay que valerse de análisis genéticos más sutiles para determinar con precisión la pérdida de los genes.

Tales análisis, de los que fue pionero Webster K. Cavenee (actualmente en el Instituto Ludwig de Investigación del Cáncer, de Montreal), aplican, a grandes rasgos, la estrategia seguida en la búsqueda del gen *Rb*: examinan el destino de su vecino. En el análisis de Cavenee, los vecinos más estrechamente ligados eran secuencias específicas de ADN que podían presentar versiones distintas (heterocigotas) en el tejido normal y versiones idénticas (homocigotas) en el tumoral. El paso de la heterocigosis a la homocigosis ofrece un buen indicativo del curso que siguen los antioncogenes estrechamente ligados a ellos.

Contamos ya con una extensa relación de genes que pierden, así parece, las dos copias funcionales durante la manifestación de un tipo u otro de cáncer. Demos algunos ejemplos: en el cáncer ductal de mama está implicado también un gen alojado en el brazo largo del cromosoma 13; en el tumor renal de Wilms se trata de un gen situado en el cromosoma 11; el carcinoma de células pequeñas del pulmón parece ser consecuencia de la alteración de un gen del cromosoma 3. En todos esos casos se ha visto que, durante la evolución de un clon de células tumorales, las dos copias de un determinado gen suelen perderse o inactivarse. Tal especificidad del tejido (la asociación de la pérdida de ciertos genes con tipos específicos de tumores) sugiere que esos genes están involucrados en la limitación del desarrollo de una gama muy estrecha de tipos celulares.

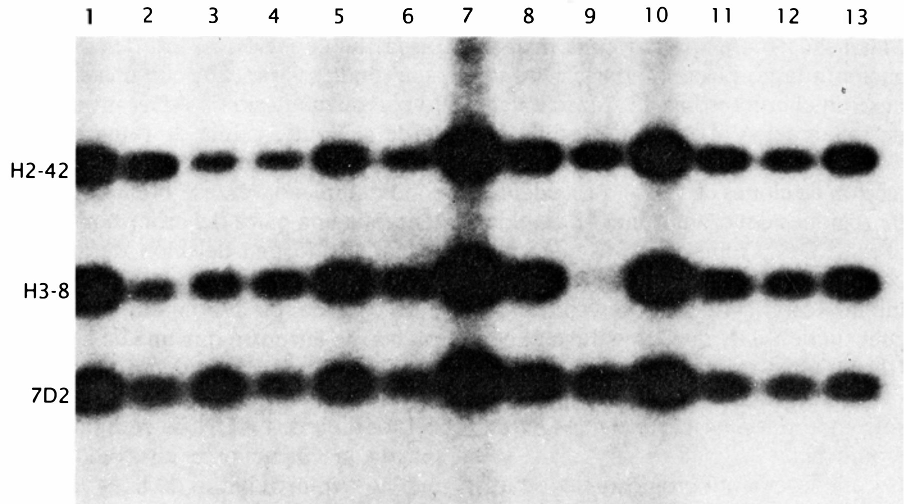
Se creyó en un comienzo que el ám-



4. EJEMPLO HIPOTETICO de retinoblastoma familiar representado en el nivel celular. A consecuencia de un accidente genético, se pierde la región que lleva *Rb*, el gen del retinoblastoma, en el único cromosoma 13 de un óvulo (célula germinal femenina) de la primera generación. Un hijo varón hereda el cromosoma que lleva la deleción (*negro*), que se transmitirá, al multiplicarse el óvulo fecundado, a todas las células de su cuerpo, incluidas las células de la retina. Durante la lactancia, o durante la primera infancia, una mutación somática inactiva la segunda copia del gen en una célula de la retina (*flecha*) y se desarrolla el tumor. Se reseca el tumor antes de que se extienda y el paciente sobrevive hasta la madurez. La mitad aproximada de los espermatozoos que produce portan la forma del cromosoma 13 acortada por la deleción y, por tanto, aproximadamente la mitad de sus hijos heredarán la predisposición al retinoblastoma.

bito de acción del gen *Rb* se circunscribía a la tumorigénesis retiniana. Sin embargo, un meticuloso seguimiento clínico de niños afectados muy tempranamente por retinoblastoma familiar reveló que, en etapas posteriores de su desarrollo, padecían una incidencia muy alta de tumores que se originaban en células del tejido conjuntivo; en particular, osteosarcomas, derivados de las células formadoras de la médula ósea. En otras palabras, las copias mutantes del gen del retinoblastoma no predisponen sólo al retinoblastoma. En efecto, pruebas recientes sugieren que la alteración del gen *Rb* resulta tan frecuente en los osteosarcomas como en los retinoblastomas, incluso en osteosarcomas de individuos que no presentan antecedentes de retinoblastoma. En muchos pacientes con osteosarcoma, el tumor parece ser consecuencia única de accidentes genéticos somáticos que afectan al gen *Rb*.

Ello plantea un nuevo enigma, pues ni la evolución ni el desarrollo embrionario de la retina y de los tejidos que dan origen a esos otros tumores manifiestan ningún nexo común. Quizá, durante la evolución de los primitivos antecesores pluricelulares de los seres humanos, hace más de mil millones de años, un precursor del actual gen *Rb* quedó implicado en el control del crecimiento de dos tipos celulares muy diferentes y de sus tejidos asociados.



5. BUSQUEDA DEL GEN *Rb*, que comenzó cuando Dryja sometió a prueba los fragmentos del ADN del cromosoma 13 normal para determinar si faltaba alguno en el ADN del retinoblastoma, lo que indicaría que probablemente constituyera parte del gen cuya deleción conducía a la tumorigénesis. La electroforesis en gel que se muestra ofrece un resultado determinante. Los fragmentos H2-42 y 7D2 se han hibridado con fragmentos complementarios del ADN de los 13 tumores sometidos a ensayo; marcados con un compuesto radiactivo, se distinguen en el gel cual bandas oscuras. El tercer fragmento, H3-8, se ha unido con el ADN de 12 de los tumores, pero no ha encontrado el fragmento correspondiente en el ADN del tumor 9; el segmento del cromosoma 13 representado por la sonda H3-8 está suprimido en el ADN de ese tumor.

La hipótesis según la cual la anormalidad de ciertas células tumorales residiría en la *pérdida* de fragmentos clave de información genética se ha visto corroborada por una línea de trabajo experimental, totalmente distinta, iniciada en buena parte por Henry Harris, de la Universidad de Oxford. Aplicó técnicas de fusión que permiten obtener células híbridas a partir de dos células genéticamente distintas. En el procedimiento se utiliza un agente que suelda las membranas externas de las células vecinas, formándose una gran membrana que envuelve los núcleos de las dos células involucradas. Las dotaciones cromosómicas de las dos se amalgaman entonces en un solo conjunto que contiene el doble de la cantidad usual de información genética. La razón de esos matrimonios de conveniencia estriba en la posibilidad de observar cómo se mezclan los rasgos de ambos cónyuges después de la unión. Con frecuencia, los genes de uno de ellos podría dominar a la hora de definir la conducta del híbrido.

A lo largo de los últimos veinte años, ciertos experimentos de ese tenor propiciaron una observación sorprendente: los híbridos de células tumorales malignas y células normales solían comportarse como sus progenitores normales, es decir, no formaban tumores. Ello contradecía lo sugerido por la intuición: que las células de tumores virulentos presentaban rasgos mucho más potentes que los de sus vecinas normales.

La explicación se halló una vez más en el descubrimiento de que la transformación aberrante de las células tumorales se debía, con frecuencia, a la pérdida de uno o más genes supresores de la proliferación. Al fusionarse con otra normal, la célula tumoral recobraba el gen regulador del crecimiento que había perdido en el comienzo de su evolución hacia la malignidad. El gen restituido puede volver a imponer el control de la proliferación por mucho tiempo que haya pasado descontrolada la célula.

Recientemente, Eric J. Standbridge, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en Irvine, ha ofrecido una demostración espectacular de esa vuelta al control. Su equipo, que trabajaba con un grupo de tumores, entre ellos el de Wilm, comprobó que la fusión de una célula de tumor de Wilm con otra normal producía un híbrido que no era tumorígeno.

El grupo logró introducir un cromosoma 11 normal en células de tumor de Wilm; al adquirir ese refuerzo genético, las células revertieron a su forma normal: perdieron la capacidad de formar tumores. Más directamente que pudiera hacerlo la fusión celular, ello demostraba que la proliferación maligna de esas células tumorales dependía de la ausencia de uno o varios genes que en circunstancias normales se encuentran en el cromosoma 11.

Los hallazgos facilitados por la hibridación de células, así como los obtenidos por Standbridge, reafirmaron notablemente la impresión de que la pérdida de información genética puede ser tan importante para la formación de tumores como la creación de oncogenes promotores de la proliferación hiperactiva. A largo plazo, esa observación podría abrir la vía hacia una terapia basada en la introducción de genes en la células tumorales que carecen de ellos.

Pese a tales avances, el gen *Rb* tenía sólo entidad teórica hasta hace muy poco; su existencia se infería de los fenómenos genéticos que acabo de describir. En última instancia, la meta de los biólogos celulares y de los bioquímicos se cifra en conocer el mecanismo molecular exacto a través del cual genes como el *Rb* limitan o inhiben la proliferación celular. Para lograr ese objetivo, lo mejor era aislar el gen por clonación molecular. El aislamiento del gen *Rb* constituía un reto muy especial: los efectos más conspicuos del gen sólo se manifiestan en su ausencia. Resultaba, pues, difícil diseñar métodos de ensayo que revelaran si un fragmento de ADN contenía o no el gen buscado.

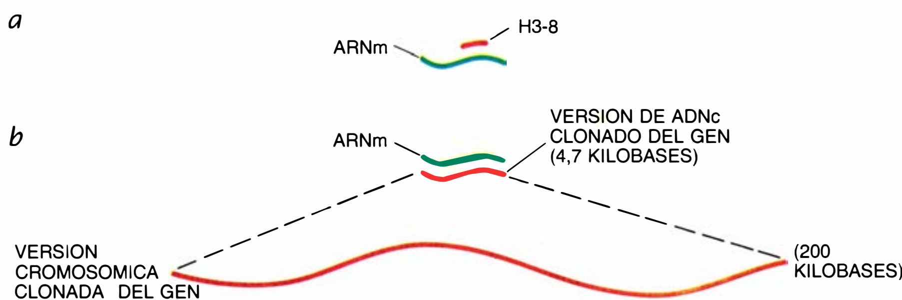
Thaddeus P. Dryja, del Hospital de

las enfermedades del ojo y del oído, de Massachusetts, emprendió una investigación a largo plazo en 1983, centrándose en el cromosoma 13. Marc Lalande y Samuel A. Latt, del Hospital Infantil de Boston, habían creado una colección de clones de ADN, procedentes de regiones del cromosoma 13 elegidas al azar. Dryja rebuscó por la colección, convencido de que alguno de los fragmentos estaría relacionado con la secuencia de ADN que constituye el gen *Rb*. La tarea resultó abrumadora: ahora sabemos ya que el gen *Rb* representa sólo una milésima parte del ADN del cromosoma.

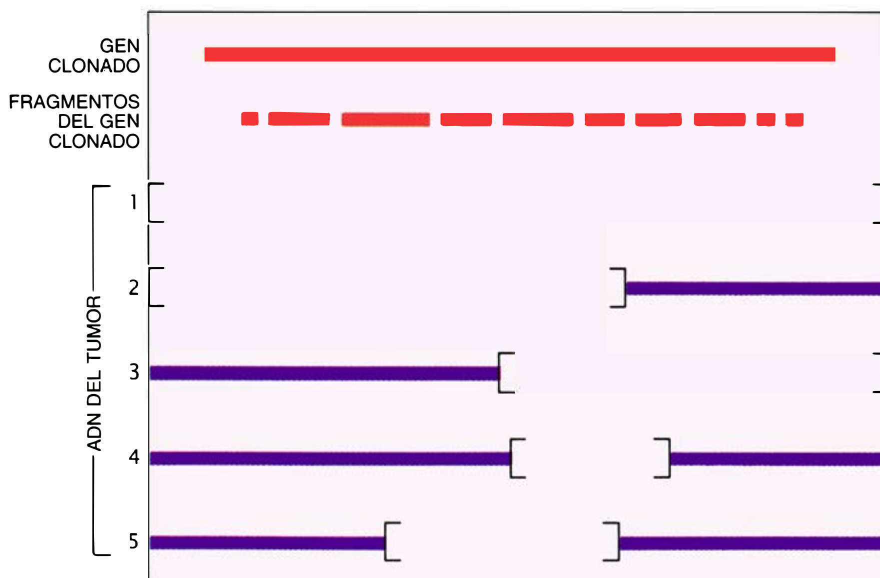
Cada fragmento cromosómico se utilizó como "sonda" en ensayos de hibridación de ADN. El test demostraba si la sonda se apareaba con un segmento complementario de ADN procedente de cualquier célula de retinoblastoma, o si no lo lograba, señal de que la sonda empleada en ese momento pertenecía a una parte del cromosoma que había sufrido una deleción durante la formación del tumor.

La jugada de Dryja dio resultado cuando se encontró que una de las sondas clonadas procedía de un segmento del cromosoma que aparecía borrado del todo en dos ADN de retinoblastoma de la cincuentena ensayados. Lo que no demostraba, ni de lejos, que el fragmento clonado fuera parte siquiera del gen *Rb*. Pero sí sugería, cuando menos, que el fragmento representaba una secuencia situada cerca de *Rb* en el cromosoma afectado por la deleción en el trancurso de los accidentes genéticos que habían abocado en la formación de los dos retinoblastomas.

El grupo de Dryja, junto con Stephen H. Friend y otros colaboradores de mi laboratorio, del Instituto Whitehead de Investigación Biomédica, lograron establecer la relación precisa entre el fragmento clonado y el gen *Rb*, manifiestamente ligado a él. En primer lugar, se descubrió que el fragmento clonado guardaba un estrecho parentesco con una molécula de ARN mensajero de las células normales de la retina. El ARN mensajero (ARNm) es el ácido nucleico que transfiere información desde los genes activos del núcleo celular hacia el citoplasma, donde la maquinaria responsable de la fabricación de las proteínas lee dicha información. El hallazgo de esa relación entre un ARNm de célula retiniana y el fragmento clonado de ADN denotaba que (gracias a un formidable golpe de suerte) el fragmento formaba parte del gen que se expresa en las células retinianas normales. Resultaba significativo que no pudiéramos detectar ARNm relacionado con el fragmento en ninguno de los retinoblastomas: el gen del cual derivaba el ARNm estaba inactivo, o no se encontraba, en las células tumorales; comportamiento éste que era coherente con el del gen *Rb*.

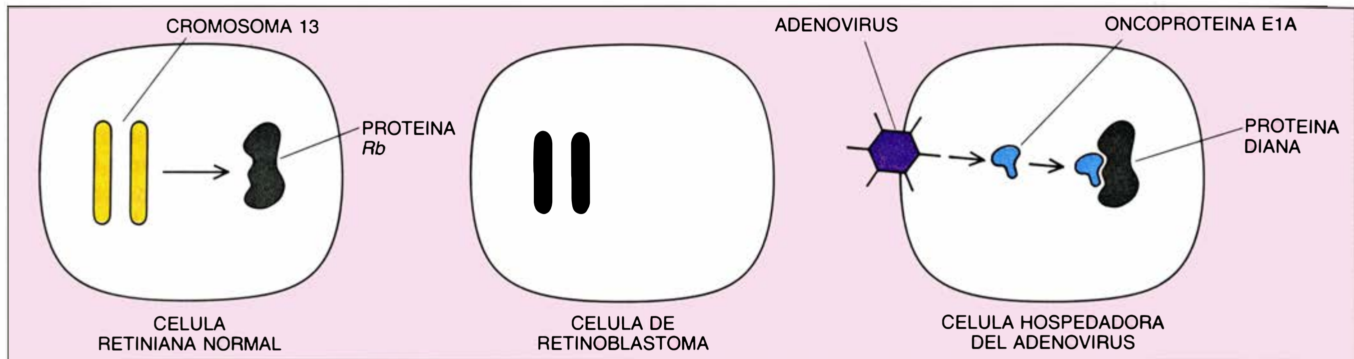


6. SERIE DE EXPERIMENTOS que condujo a la clonación de un gen y a su identificación como gen *Rb*. Por sonda se utilizó ARN mensajero de células retinianas normales que rastreara la presencia de H3-8, el fragmento que había aparecido delecionado en varios ADN de retinoblastomas. La sonda descubrió un ARNm (*a*) estrechamente vinculado, lo que indicaba que H3-8 formaba parte de un gen activo en las células retinianas normales. Se sometió luego el ARNm a transcripción inversa (*b*), para obtener así una copia en ADN (un clon de ADNc), que sirvió a su vez de sonda para hallar y clonar la larga cadena (200.000 bases) de ADN que representaba el gen constituido en responsable del ARN mensajero; ese gen podría ser el *Rb*.



7. IDENTIFICACION DEL GEN CLONADO como gen del retinoblastoma; se estableció al comprobarse que ese gen, y no algún vecino, constituía la diana afectada por las deleciones cromosómicas que habían desencadenado el desarrollo de los retinoblastomas. Se emplearon, como sondas, fragmentos del gen clonado para situar en el mapa cromosómico las deleciones de los ADN tumorales. Las sondas revelaron deleciones (*1*) que, por eliminar el gen entero y secuencias vecinas situadas a ambos lados, no ofrecían información suficiente para resultar determinantes. Otras deleciones eliminaban la parte izquierda del gen y las secuencias adyacentes del lado izquierdo (*2*); tales deleciones podían haber causado los tumores dañando el gen clonado o bien lesionando otro gen, situado a la izquierda de aquél, que era el gen *Rb*. Otras (*3*) eliminaban la parte derecha del gen y las secuencias situadas a su derecha. Sin embargo, en unos cuantos tumores (*4* y *5*), la deleción eliminaba solamente regiones internas del gen clonado. Tales deleciones mostraban que el gen clonado constituía la diana cuya inactivación daba lugar al tumor; se trataba, por consiguiente, del gen *Rb*.

Quedaba por confirmar la posibilidad de que el gen fuese el propio *Rb*. Friend obtuvo una copia del ADN correspondiente a ese ARNm mediante el procedimiento conocido por transcripción inversa. Se utilizó el "ADNc", fruto de esa retrotranscripción, como sonda para revisar y localizar la región entera en el cromosoma normal responsable de la síntesis del ARNm (es decir, el gen que podría ser *Rb*) y para clonarlo. Se descubrió que el gen clonado era muy grande: abarcaba unas 200.000 bases de ADN. De nuevo, mediante hibridaciones del ácido nucleico, se estudió la configuración de ese gran dominio cromosómico en el ADN de 60 retinoblastomas y osteosarcomas. Se advirtió que, en un 30 por ciento de las muestras de ADN, la deleción había provocado cambios estructurales de importancia en una o las dos copias del gen clonado. (En ese análisis habrían pasado por alto cambios más sutiles de la estructura del ADN, de efectividad comparable para inactivar un gen.)



8. EL GEN *Rb* CODIFICA UNA PROTEINA que se encuentra en el núcleo de células retinianas normales (*izquierda*), aunque no en las células del retinoblastoma (*centro*). La oncoproteína *E1A* de un adenovirus transforma las células infectadas uniéndose a una proteína diana situada en la célula hospedadora, que, como se demostró en el laboratorio del autor, resultó ser idéntica a la proteína *Rb* (*derecha*). Que la proteína cuya ausencia en la célula retiniana da origen a un tumor esté también involucrada en la transformación por adenovirus induce a suponer que podría constituir un regulador central de la proliferación.

Teníamos pruebas ya de que el gen del ADN clonado solía inutilizarse en retinoblastomas de distinto origen. Pero, ¿representaba ese gen clonado al propio gen *Rb*? Las pruebas definitivas se obtuvieron examinando la configuración precisa de las deleciones que afectaban al segmento clonado [*véase la figura 7*]. Se trataba de probar que el gen clonado comprendía el gen *Rb*, y no ningún otro sin mayor relevancia, que se alojara, en el cromosoma, a su derecha o izquierda.

Algunas de las deleciones señaladas en el mapa implicaban la pérdida del gen clonado entero. No ofrecían ninguna información que nos llevara al quid de la cuestión: el gen clonado podía haberse suprimido al perderse alguna otra parte de la región que incluyera la diana teórica, es decir, el gen *Rb*. Más significativas eran otras tres deleciones, que afectaban tanto al extremo derecho del gen como al ADN adyacente situado a la derecha. Indicaban que la diana de la deleción se encontraba a la derecha del gen clonado, si no era éste mismo. Pero otras mutaciones causaban la pérdida del extremo izquierdo del gen clonado, así como de otras secuencias situadas también a la izquierda. Cada vez parecía más verosímil que el gen clonado constituía el blanco de esas deleciones estocásticas.

La prueba definitiva llegó con el descubrimiento de dos deleciones que empezaban y terminaban dentro de los confines del gen clonado. Demostraban de forma inequívoca que las deleciones aleatorias que provocaban retinoblastoma convergían en el gen clonado y no en los segmentos vecinos del ADN.

Nuestro trabajo ha sido reproducido y ampliado posteriormente por Wen-Hwa Lee, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Diego, y por Yuen-Kai Fung y William F. Benedict, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California del Sur. En conjunto, los resultados prueban que el gen clonado es, en efecto, el gen *Rb* normal. Lo más convincente es el hallazgo repetido de que ese segmento del ADN aparece afectado por importantes deleciones en muchos tumores de origen independiente.

La confirmación final de la identidad del gen clonado deberá obtenerse de una prueba funcional, en la que se inserten en células tumorales, carentes del gen *Rb* intacto, clones de ADN que porten versiones intactas del supuesto gen *Rb*. Si las células revierten entonces a la normalidad, aunque sea parcialmente, se reforzará la hipótesis de que el ADN clonado ofrece la información genética decisiva cuya pérdida desencadena la formación del tumor. En varios laboratorios se está experimentando ya sobre esa posibilidad.

Son muchas las vías experimentales que pueden seguirse después de aislar por clonación supresores de la proliferación del tipo de *Rb*. Vienen a la mente numerosos problemas de investigación básica, así como aplicaciones clínicas. La utilidad clínica se ve en el posible empleo de segmentos clonados de ADN para analizar la estructura de secuencias relacionadas en muestras normales y tumorales de muy diversa índole, asimismo para detectar versiones alteradas de *Rb* y otros genes. El lector recordará que los progenitores afectados pasan alelos mutantes de *Rb* a la mitad de la descendencia, por término medio. Teóricamente, con una sonda clonada podrían detectarse los alelos de *Rb* defetuosos en los primeros estadios embrionarios, dato que permitiría pronunciarse sobre la probabilidad de que aparezcan tumores en etapas posteriores de la vida.

Más allá de las aplicaciones clínicas se vislumbran diversos problemas de biología fundamental. *Rb* es el primer gen supresor de la proliferación del cáncer que ha logrado aislarse. Todo lo que se ha aprendido de él habrá de seguirnos cuando se trate de un grupo de genes que actúan de manera similar y que participan en la limitación del crecimiento o proliferación de uno u otro tipo celular. Tal conjunto de genes, ya conocido en virtud de su deleción en ciertos tumores, podría representar sólamente la punta del iceberg. El número de oncogenes descifrados supera la cincuentena, y no puede siquiera aventurarse la lista de los genes que ejercen un control o regulación negativos.

¿De qué mecanismos se sirven esos genes para limitar o suprimir la proliferación normal? Ese es el nudo de la cuestión. Hace algunos meses, el grupo de Lee informó de que el gen *Rb* especificaba una proteína, de peso molecular 105.000, que se encuentra en el núcleo de la célula. Las proteínas nucleares aparecen a menudo implicadas en la regulación de la expresión génica.

Acaba de obtenerse una prueba sólida de que *Rb* determina una proteína reguladora. El logro se ha conseguido en un contexto ajeno a este asunto: el estudio del mecanismo que emplean los virus para transformar las células que infectan. Según se sabe, uno de esos virus, un adenovirus, inserta el oncogén *E1A* en las células diana sensibles. El oncogén especifica una proteína que reprograma el metabolismo de la célula hospedadora y desencadena el comportamiento maligno. ¿Cómo actúa esa oncoproteína?

Investigadores del grupo de Ed Harlow, del Laboratorio Cold Spring Harbor, de Nueva York, y el grupo de Philip E. Branton, de la Facultad de Medicina de la Universidad McMaster, de Ontario, habían encontrado que, en las

células transformadas por virus, la oncoproteína vírica formaba un complejo con ciertas proteínas de la célula hospedadora. La proteína vírica alteraba presumiblemente esos puntos diana, pulsando así los interruptores celulares que inducían la transformación.

Una de las dianas con las que formaba complejo la oncoproteína era una proteína de la célula hospedadora de peso molecular 105.000. Harlow, Peter Whyte y Karen Bruchkovich observaron que las propiedades de la proteína se parecían a las de *Rb*. Con Jonathan Horowitz demostraron en mi laboratorio que esas dos proteínas eran idénticas. Es decir, que la proteína *E1A* del adenovirus confería malignidad a las células acomplejándose con (y tal vez así inactivado) la proteína que determina el gen *Rb* y de la que carecen las células del retinoblastoma. Dado que la proteína *E1A* es un regulador directo de la expresión génica, la proteína *Rb* debe estar también implicada en la modulación de la expresión génica.

No cabe duda de que en unos pocos años se habrán esclarecido todos los puntos del tema. Cuando así sea, conoceremos por fin las dos caras de la moneda: cómo se conecta y se desconecta la proliferación celular. Y con ello se enriquecerá nuestro conocimiento sobre el origen del cáncer y sobre los todavía oscuros mecanismos a través de los cuales los óvulos fecundados se desarrollan hasta dar lugar a organismos complejos, como nosotros mismos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MUTATION AND CANCER: STATISTICAL STUDY OF RETINOBLASTOMA. Alfred G. Knudson, Jr., en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 68, n.° 4, págs. 820-823; abril de 1971.

PREDICTION OF FAMILIAL PREDISPOSITION TO RETINOBLASTOMA. W. K. Cavenee, A. L. Murphree, M. M. Shull, W. F. Benedict, R. S. Sparkes, E. Kock y M. Nordenskjold en *The New England Journal of Medicine*, vol. 314, n.° 19, págs. 1201-1207; 8 de mayo de 1986.

A HUMAN DNA SEGMENT WITH PROPERTIES OF THE GENE THAT PREDISPOSES TO RETINOBLASTOMA AND OSTEOSARCOMA. Stephen H. Friend, Rene Bernards, Snezna Rogelj, Robert A. Weinberg, Joyce M. Rapaport, Daniel M. Albert y Thaddeus P. Dryja en *Nature*, vol. 323, n.° 6089, págs. 643-646; 16 de octubre de 1986.

THE APPROACHING ERA OF THE TUMOR SUPPRESSOR GENES. George Klein en *Science*, vol. 238, n.° 4833, págs. 1539-1545; 11 de diciembre de 1987.

Detección de átomos y moléculas con láseres

Todos los átomos o moléculas emiten y absorben luz de una longitud de onda característica. Sintonizando un láser a dicha longitud de onda específica, los átomos y moléculas pueden detectarse con una precisión sin precedentes

Vladilen S. Letokhov

El espectro luminoso constituye el "lenguaje" en el que se expresan los átomos y las moléculas. De igual modo que pueblos distintos hablan lenguas diferentes, así cada tipo de átomo o molécula emite y absorbe luz de longitudes de onda o colores característicos. Midiendo estas longitudes de onda, los investigadores han avanzado bastante, durante los últimos 100 años, en el conocimiento de las propiedades de todos los elementos de la tabla periódica y de un gran número de sus compuestos moleculares.

El método, a pesar de su potencia, presenta limitaciones. Supongamos, por ejemplo, que estamos buscando trazas de elementos radiactivos raros, de larga vida media, en muestras tomadas del agua de un río o de la atmósfera. A lo mejor, las muestras poseen sólo un átomo radiactivo por cada billón (10^{12}) de átomos y moléculas estables. La "voz" del átomo radiactivo —el conjunto característico de longitudes de onda de luz que este átomo emite y absorbe— es demasiado débil para detectarse entre el "griterío de la muchedumbre". Las técnicas usuales en espectroscopía, o medición espectral, están mil veces por debajo de la sensibilidad requerida, si no más.

Pero acaba de crearse una nueva versión del método básico que está capacitada para conseguir la precisión necesaria; podría incluso marcar el principio de una nueva etapa en la investigación en física. El nuevo método, llamado espectroscopía de ionización por resonancia, ha sido desarrollado por el autor y sus colaboradores en el Instituto de Espectroscopía de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética e, independientemente, por G. Samuel Hurst y sus colaboradores en el laboratorio estadounidense de Oak Ridge. La espectroscopía de ionización por resonancia se funda en el láser, fuente intensa de luz cuyas longitudes de onda pueden controlarse con gran precisión.

VLADILEN S. LETOKHOV es el jefe del departamento de espectroscopía lasérica y subdirector del Instituto de Espectroscopía de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética. Da clases, asimismo, en el Instituto Técnico de Física de Moscú. Se graduó en 1963 y realizó estudios avanzados de física y matemáticas en el Instituto Lebedev de Física. Le han concedido el premio Lenin y ha sido elegido miembro de la Sociedad Americana de Optica.

Para hacernos una idea de cómo funciona la espectroscopía de ionización por resonancia, imaginémonos una babel políglota, formada por cientos de personas de nacionalidades diferentes, como los constructores de la torre bíblica. Esa babel representa, aquí, los múltiples tipos de átomos y moléculas. Miles de lingüistas han estudiado y clasificado las lenguas que habla la muchedumbre y han escrito un diccionario para cada una de ellas. Lo que en otro tiempo hubiera exigido acercarse a la algarabía y concentrarse en cada una de las lenguas para identificar un individuo de una determinada nacionalidad, gracias al nuevo método podemos dirigirnos a la multitud en la lengua adecuada y solicitar a cualquiera de la nacionalidad deseada que se destaque de la muchedumbre dando un paso al frente.

A imagen de ello, podemos emplear láseres que operan en un determinado conjunto de longitudes de onda para detectar el átomo o la molécula que nos interese de una mezcla dada. Las longitudes de onda del láser pueden sintonizarse para resonar, o coincidir, con el conjunto de longitudes de onda características del átomo o molécula; la luz ioniza así el átomo o la molécula (le arranca uno de sus electrones más externos). Por ser único para cada especie el conjunto de longitudes de onda, ningún otro constituyente de la mezcla se verá afectado. Una vez ionizado, los fragmentos del átomo o de la molécula tendrán una carga eléctrica neta y podremos separarlos de la mezcla aplicando un campo eléctrico.

La espectroscopía de ionización por resonancia, muy selectiva, puede percibir hasta los "acentos" del lenguaje espectral de los átomos y moléculas. Significa ello que podemos detectar y separar especies que presenten ligerísimas diferencias, como los isótopos y los isómeros nucleares. (Llámanse isótopos los átomos que tienen el mismo número de protones aunque diferente número de neutrones [como el carbono 12 y el carbono 14]; isómeros son aquellos átomos cuyo núcleo contiene el mismo número de protones y neutrones, si bien se encuentran en estados energéticos diferentes.)

La precisión de esta técnica sugiere un amplio campo de aplicaciones. Los investigadores tendrán la posibilidad de estudiar las propiedades de los núcleos radiactivos de corta vida media. O podrán detectar trazas de impurezas en elementos considerados puros, una tarea que adquiere cada día mayor importancia, ante la continua miniaturización de los circuitos de las pastillas de silicio ("chips"). Se ha logrado incluso detectar ya un átomo raro en una muestra que contenía unos 10^{20} átomos de otros elementos.

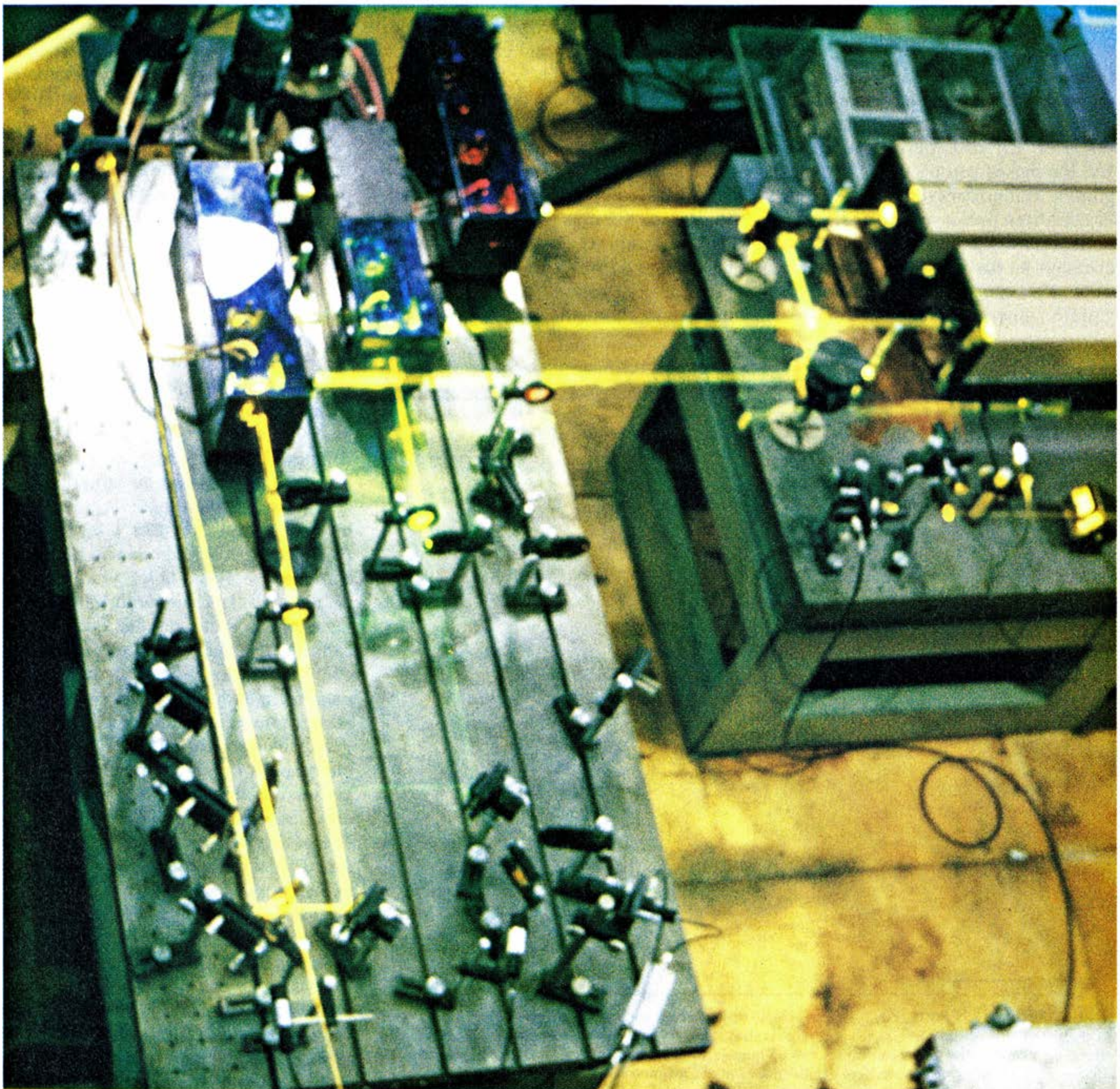
¿Por qué es la espectroscopía de ionización por resonancia una técnica tan precisa? Para responder, debemos empezar por recordar que las energías de los electrones de un átomo están cuantificadas: los electrones se encuentran sólo en un número discreto de niveles de energía. Un átomo pierde

energía cuando uno de sus electrones realiza una transición desde un nivel energético hasta otro nivel de menor energía. En este proceso, el átomo emite un fotón —un cuanto de luz— que se lleva la energía. La longitud de onda del fotón es inversamente proporcional a su energía, de manera que los fotones asociados a radiación de corta longitud de onda, tal como la luz azul, son más energéticos que los fotones asociados a radiación de larga longitud de onda, como la luz roja. Un electrón puede ir de un nivel energético hasta otro nivel de energía mayor si absorbe un fotón, pero la energía del fotón ha de ser exactamente igual a la diferencia entre las energías de los dos niveles.

La clave de la capacidad de selección de la espectroscopía de ionización por resonancia reside en la ionización escalonada de los átomos. En vez de utilizar un único fotón "azul" altamente energético para arrancar un electrón periférico de un átomo, se emplean, por ejemplo, dos o tres fotones "rojos" de menor energía. Los primeros fotones excitan el átomo hasta un estado intermedio, de manera que el electrón se encuentre entonces en un nivel energético intermedio, y el último fotón da el empuje final para arrancarlo completamente del átomo. Aunque la energía total para completar las diferentes etapas puede ser aproximadamente igual para varios elementos, la probabilidad de que dos tipos de átomos tengan idéntico conjunto de estados energéticos es cero.

Esa es la razón de que la espectroscopía de ionización por resonancia resulte tan idónea para ionizar isótopos de elementos.

Vayamos con otra ventaja que nos



1. EXPLORACION DE LAS PROPIEDADES DEL NUCLEO ATOMICO mediante espectroscopía de ionización por resonancia. Las longitudes de onda de un láser se sintonizan para que resuenen con el conjunto característico de longitudes de onda de un átomo, de manera que la luz lo ionice (le arranque uno de sus electrones periféricos). Al aplicar un campo eléctrico, podremos separar de la mezcla al átomo ionizado. Esta técnica espectroscópica sirve para explorar la estructura de los núcleos, ya que las longitudes de onda de la luz emitida y absorbida por un átomo dependen de la estructura de su núcleo. En este laboratorio del Instituto de Física Nuclear B. P. Konstantinov en Gatchina (Unión Soviética), los átomos se clasifican según su masa mediante el aparato de arriba y se irradian mediante la luz de longitud de onda controlada, que procede de los láseres instalados en la parte inferior. En la figura 3 se ilustra mejor el dispositivo.

ofrece el método: su aplicabilidad casi universal. Funciona con la inmensa mayoría de sustancias, siempre que permitan formar un haz atómico. En algunos casos, habrá que vaporizar antes la muestra. Pues bien, simplemente calentando la muestra con un filamento, un láser de poca potencia o un haz de átomos, suele obtenerse un vapor cuya composición refleja la de la muestra original.

Aludiremos, por último, a la extraordinaria eficacia de la técnica. Las mediciones duran un brevísimo intervalo de tiempo, en contraposición con el largo período de observación que demandan los restantes métodos espectroscópicos, que recogen débiles señales de gran cantidad de átomos. El tiempo de funcionamiento de la espectroscopía de ionización por resonancia viene determinado por la duración de los pulsos del láser. En los experimentos normales, los pulsos son de unos 10 nanosegundos (milmillonésima de segundo). Si se utilizan pulsos más cortos, el tiempo de operación puede disminuir hasta el rango de los picosegundos (billonésimas de segundo) o de los femtosegundos (milésimas de picosegundos).

En 1971, y en el centro del autor, se acometió la primera prueba realizada con éxito de la ionización escalonada de átomos por resonancia. El trabajo se llevó a cabo con átomos de rubidio. Desde entonces, muchos laboratorios han aplicado con éxito esta técnica a sustancias muy diversas.

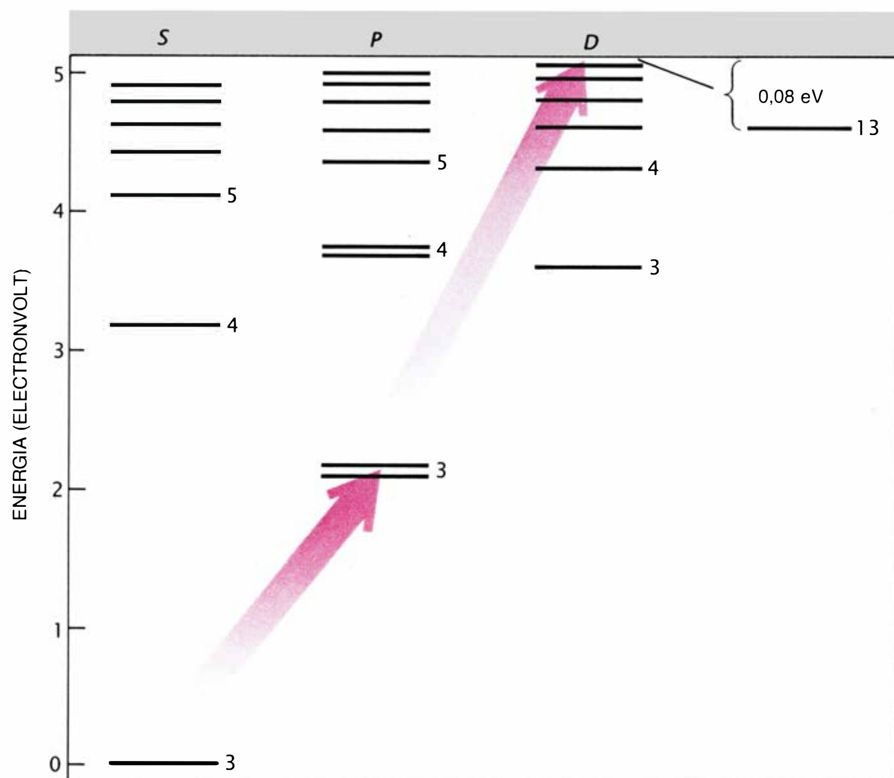
Así, en 1977, se recurrió a esta técnica para detectar átomos de un elemento. Hurst y sus colaboradores de Oak Ridge realizaron la ionización por resonancia sobre átomos individuales de cesio. El electrón arrancado de cada átomo se detectó mediante un contador Geiger, instrumento que produce una corriente medible proporcional al número de electrones que entran en él.

Ese mismo año, G. I. Bekov y V. I. Mishin, del Instituto de Espectroscopía, instalado en las proximidades de Moscú, ionizaron átomos de sodio que formaban parte de un haz de partículas. Utilizaron para ello dos láseres sintonizables (láseres con longitudes de onda ajustables). El primero excitaba los átomos de sodio hasta un estado intermedio y el segundo los elevaba hasta un estado altamente excitado, cercano al límite de ionización. Los electrones periféricos de estos átomos altamente excitados, llamados a veces átomos de Rydberg, están tan débilmente ligados que podemos ionizar fácilmente los átomos mediante la aplicación momentánea de un campo eléctrico. En el ensayo, los iones se aceleraron y se desviaron en el mismo campo que produjo la ionización; luego, se registraron en un multiplicador de electrones.

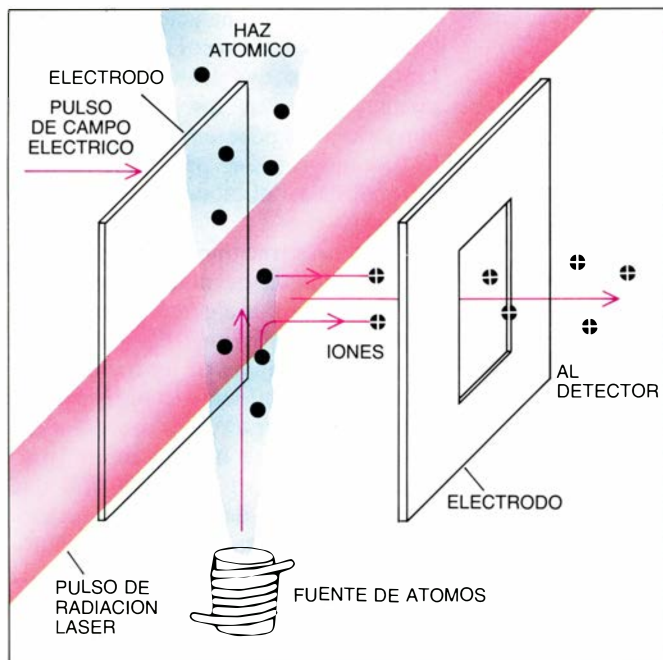
La espectroscopía de ionización por resonancia ha suministrado también información sobre la naturaleza del núcleo atómico. En particular, se utiliza normalmente para medir el radio nuclear medio de isótopos de corta vida, producidos en las colisiones entre protones y blancos fijos de materia. Este trabajo, que se está llevando a cabo en el Instituto de Física Nuclear B. P. Konstantinov y en el Instituto de Espectroscopía, abre un nuevo camino en física experimental: la combinación de física de láseres con la física nuclear.

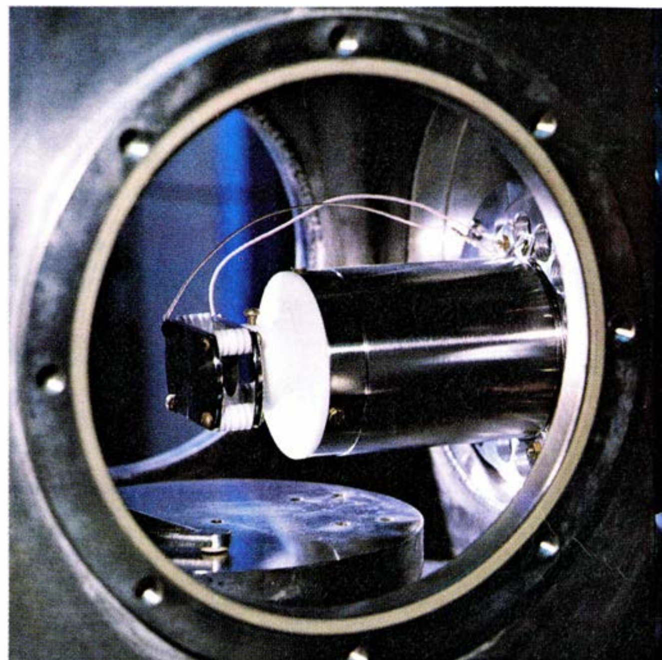
En este estudio, los elementos de corta vida media se difunden desde el blanco donde se generan y atraviesan un separador que los clasifica según su masa. La mezcla final consiste en elementos que tienen la misma masa (el mismo número total de protones y neutrones), aunque diferente composición atómica (diferente número de protones) y diferente composición isotópica (número de neutrones). Se introducen luego los átomos en una cámara de vacío; allí se irradian mediante pulsos de luz procedentes de tres láseres sintonizables. Para seleccionar un elemento concreto, se ajusta la longitud de onda de los láseres. Cambiando la masa de los elementos que pueden entrar en la cámara de vacío, podemos comparar cómo varían los niveles energéticos de un determinado elemento al cambiar el número de neutrones del núcleo.

De acuerdo con la teoría, los niveles energéticos de un átomo dependen ligeramente del volumen del núcleo. Por ello, las medidas de cómo los niveles energéticos de un átomo cambian en función del número de neutrones de un núcleo pueden ayudarnos a determinar el radio del mismo. Esto ha permitido medir el radio nuclear de largas cadenas de isótopos de corta vida media del europio y de algunos elementos de las llamadas "tierras raras" en relación con el radio nuclear de los isótopos estables. Los resultados obtenidos muestran que, cuando el número de neutrones decrece, los radios disminuyen al principio, para ir luego en aumento. Este comportamiento anormal débese probablemente a una deformación nuclear.



2. FUNDAMENTO TEORICO de la espectroscopía de ionización por resonancia. Esta técnica se basa en el carácter cuántico de las energías de los electrones en el átomo; la energía de los electrones no puede tomar valores arbitrarios, sino que encontramos sólo un número discreto de valores de la energía. Aparecen dibujados aquí ciertos niveles energéticos del átomo de sodio. Cada uno de los dos electrones más exteriores posee su energía mínima cuando se halla en su estado fundamental (designado por 3*s*). Tal electrón puede arrancarse de un átomo de sodio cuando absorbe un fotón (un cuanto de luz), siempre que tenga una energía, como mínimo, de 5,14 electronvolt. (La energía de un fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda: a mayor energía, menor longitud de onda.) Para que la técnica alcance la mayor precisión posible, los átomos se ionizan de una manera escalonada. Un átomo de sodio, por ejemplo, se ioniza excitando primeramente el electrón hasta un nivel intermedio, 3*p* (*flecha inferior izquierda*), y luego a un estado de mayor excitación, 13*d* (*flecha superior derecha*); la remoción final se debe a la aplicación de un campo eléctrico.



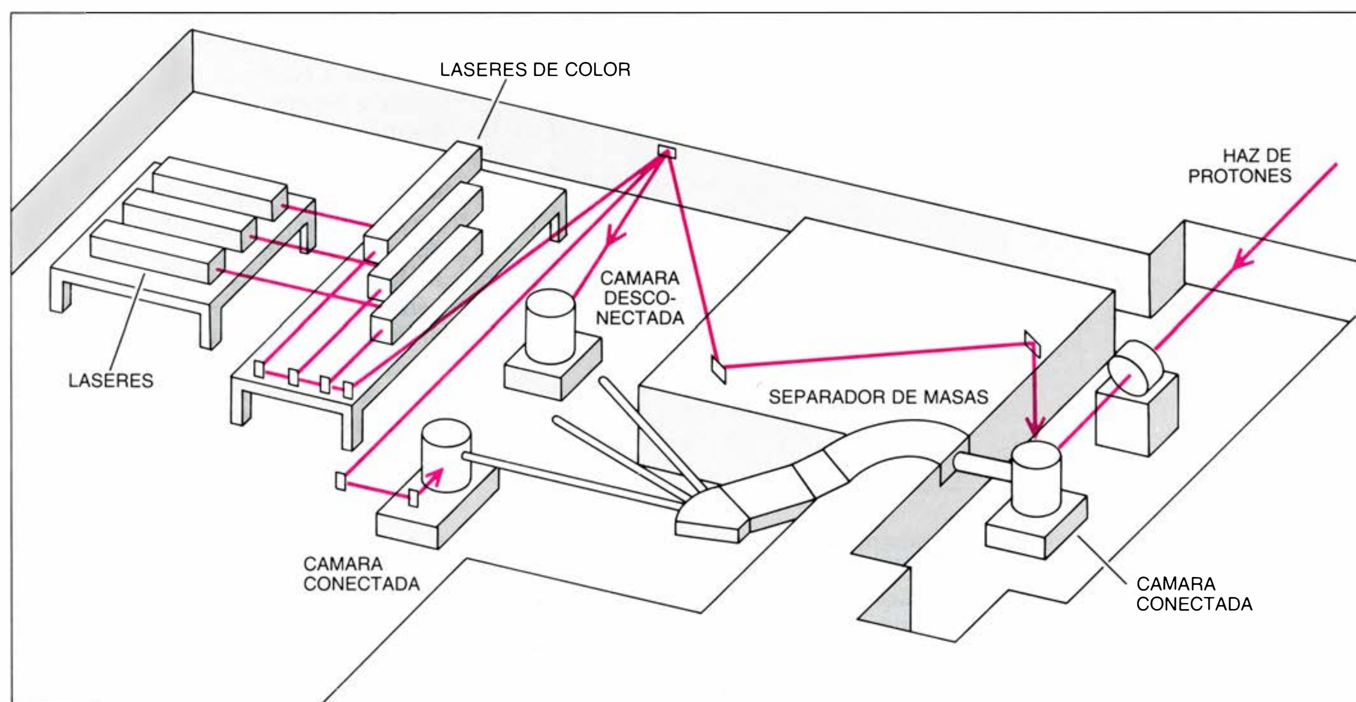


3. APARATO PARA DETECTAR ATOMOS uno a uno, del instituto B. P. Konstantin. Lo ofrecemos en un dibujo esquemático (*izquierda*), junto con una fotografía de la cámara de vacío (*derecha*), donde los átomos a detectar experimentan la ionización por resonancia. La primera etapa del análisis consiste en calentar la muestra, formando un haz de átomos. El haz viaja hacia arriba, a través de una región limitada por dos electrodos. Pulsos de luz procedentes de un láser y campos eléctricos aplicados durante un brevísimo período ionizan determinados tipos de átomos; otras clases de átomos continúan viajando hacia arriba. Los campos eléctricos envían los iones a un multiplicador electrónico (*cilindro de la derecha*), que cuenta el número de iones generado en el proceso.

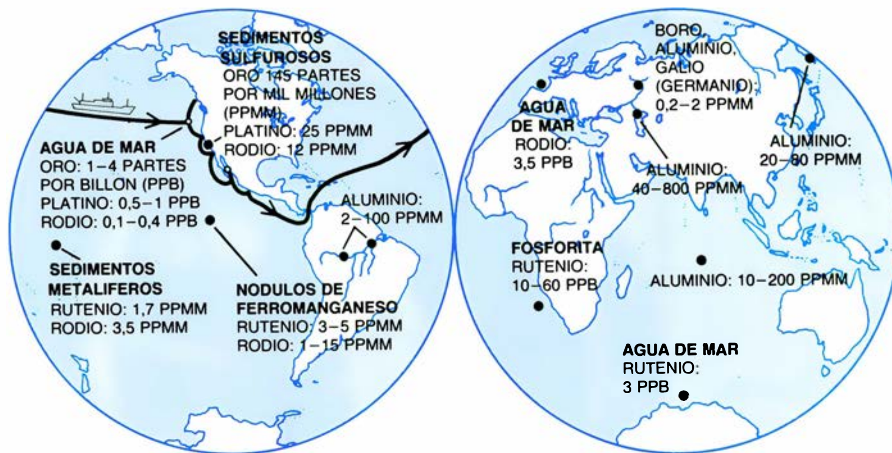
El rápido éxito alcanzado por la espectroscopía de ionización por resonancia sugiere que, en un futuro próximo, este método podría competir con los métodos ya existentes en física nuclear para la detección de isótopos radiactivos muy escasos y de larga vida media.

La espectroscopía de ionización por resonancia extiende su ámbito de aplicación al análisis de trazas de elementos en materiales naturales de composición compleja: agua de mar, vetas minerales, suelos y tejidos biológicos. Hoy podemos identificar ya trazas de elementos con un nivel de precisión de una parte por billón. Lo que, en nuestra opinión, abre nuevas e interesantes perspectivas, a la hora de abordar la distribución de concentraciones ultrabajas de elementos raros en la corteza terrestre y en el agua del mar, para profundizar con ello en la historia geológica de la Tierra.

El conocimiento de la distribución de los elementos raros en el agua del mar reviste interés para la oceanografía, la



4. COMPROBACION DE LAS PROPIEDADES de los núcleos atómicos mediante la espectroscopía de ionización por resonancia, método desarrollado por el autor. Los núcleos se producen acelerando protones hasta una energía de mil millones de electronvolt y dirigiéndolos contra un blanco fijo. Los núcleos de corta vida media, que perduran desde segundos hasta varias horas, se estudian en la cámara conectada; los núcleos de vida media mayor se estudian en la cámara desconectada. Las investigaciones se realizan mediante pulsos de luz láser procedente de tres láseres que poseen longitudes de onda sintonizables.



5. ELEMENTOS TRAZA del agua de mar, agua de río y varios sedimentos y depósitos, analizados, mediante espectroscopía de ionización por resonancia, en el laboratorio de instalado a bordo del buque oceanográfico *Akademik Mstislav Keldysh*, en 1986. Para aumentar la rapidez de los análisis, se utilizó un absorbente que extrajo los metales nobles (metales resistentes a la corrosión como el oro y el platino) del agua de mar o de otras soluciones. Absorbidos ya los metales, se incineró el absorbente y se vaporizaron las cenizas calentándolas en una cámara de vacío, para formar un haz atómico al que podía aplicarse la espectroscopía de ionización por resonancia. Estas técnicas permitieron obtener datos con una precisión de una parte por billón acerca de las concentraciones en materiales oceánicos de los elementos del grupo químico del platino.

geología, la geoquímica y la cosmoquímica. Las investigaciones en ese dominio aumentan también nuestro conocimiento de los procesos involucrados en la formación de la litosfera (la capa sólida más externa de la Tierra, que incluye su corteza). Añádese, además, que algunos de estos elementos raros son metales nobles (metales que presentan resistencia a la corrosión, tales como el oro o el platino). El estudio de la distribución de las trazas de estos elementos presenta, pues, connotaciones prácticas y científicas; podría permitir, por ejemplo, encontrar nuevos yacimientos de estos metales en los océanos.

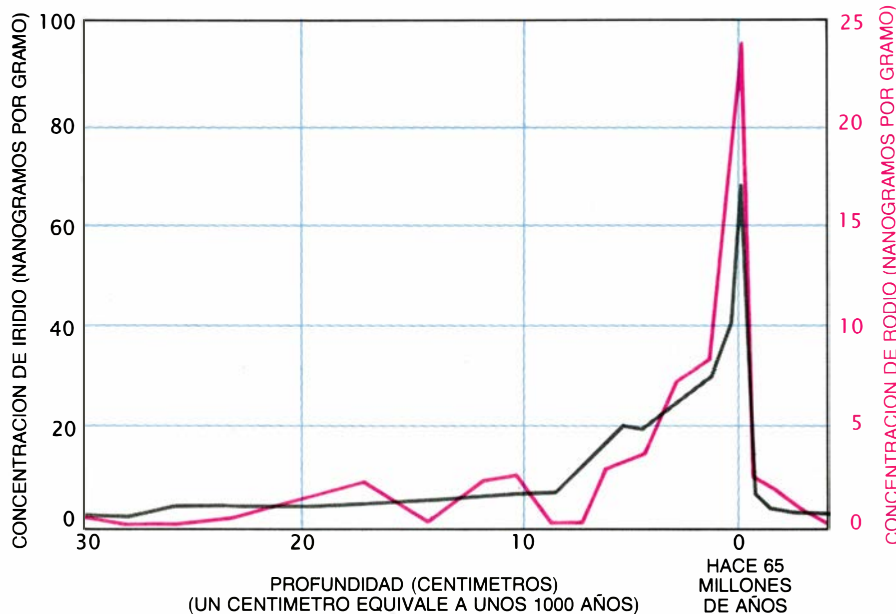
Debido a la complejidad e inconstancia de la composición del agua marina, y a que no es posible almacenarla durante períodos largos de tiempo sin que cambie, algunos investigadores la consideran un "organismo vivo", que debe analizarse inmediatamente después de recogida la muestra. Los geólogos que trabajan en tierra pueden postergar los análisis de las muestras recogidas en el campo; para los oceanógrafos es preferible realizar los análisis en el laboratorio instalado a bordo.

Las concentraciones de metales nobles en el agua de mar son extremadamente bajas —algunas veces, inferiores a una parte en 10^{12}—. Por ello, su medición a través de los métodos espectroscópicos al uso requeriría varias etapas de concentración, procedimiento que es difícil e inconveniente (particularmente en el mar). De ahí que sólo se disponga de datos muy escasos sobre la concentración de metales nobles en el agua de mar. La técnica de espectroscopía de ionización por resonancia constituye una opción alternativa prometedora.

Para realizar medidas analíticas a bordo de un barco, los investigadores del Instituto de Espectroscopía y del Instituto de Oceanología de Moscú desarrollaron un modelo "expedicionario" de espectrómetro de ionización por resonancia láser. Se instaló en el buque oceanográfico *Akademik Mstislav Keldysh* y operó durante su duodécima campaña (en 1986); se empleó para determinar las concentraciones de oro y metales pertenecientes al mismo grupo químico del platino, en el agua del mar, en suspensión, en sedimentos, en minerales marinos y en rocas sulfurosas. Se recogió así abundante información de interés y quedó demostrada la posibilidad de realizar análisis ultrasensibles a bordo de un barco, sin recurrir a los procedimientos tradicionales, que son tediosos y complicados.

El análisis ultrapreciso con láser ha encontrado otra aplicación provechosa en el estudio de catástrofes geológicas de singular rareza. Como muchos de los lectores conocen, los investigadores han ido acumulando, a lo largo de los últimos años, múltiples pruebas según las cuales se han registrado, durante la historia geológica, ciertos acontecimientos extraordinarios de corta duración. Se ha aventurado la hipótesis de que esos acontecimientos se produjeron a raíz de la colisión de grandes cuerpos extraterrestres contra la Tierra. Esos choques han dejado, tal parece, pistas en forma de anomalías geoquímicas e isotópicas que coinciden con los límites bioestratigráficos principales.

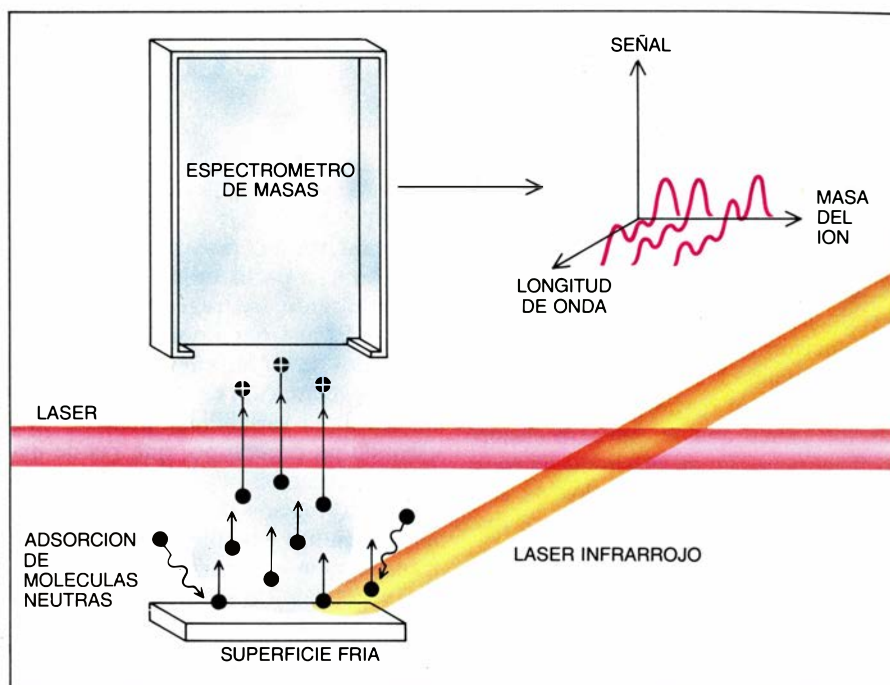
Así, el episodio más reciente ocurriría hace unos 65 millones de años, en el tránsito del período Cretácico al Terciario, coincidiendo aproximadamente



6. CONCENTRACIONES RELATIVAS de iridio y rodio en sedimentos correspondientes al tránsito del período Cretácico al Terciario (hace unos 65 millones de años); sirven de apoyo de la hipótesis según la cual la Tierra colisionó con algún gran cuerpo extraterrestre en esa época. El iridio contenido en las rocas se determinó mediante una técnica denominada análisis por activación de neutrones, y el contenido en rodio se midió mediante la espectroscopía de ionización por resonancia. Las concentraciones de ambos elementos aumentan bruscamente en la frontera entre ambos períodos geológicos. El interés de la observación reside en la abundancia de estos elementos en los cuerpos extraterrestres, mientras que escasean en las rocas terrestres. La razón entre la concentración de iridio y la de rodio –0,34 ±0,06– coincide con la razón entre concentraciones en material meteorítico (donde varía de 0,3 a 0,6). Difiere de la razón de concentraciones de las rocas de la corteza (donde varía entre 1 y 6) o del material del manto (donde varía entre 0,7 y 0,8).

con la extinción de los dinosaurios. En 1980, Luis W. Alvarez [recientemente fallecido], y sus colaboradores de la Universidad de California en Berkeley empezaron a interesarse por esta "gran extinción mesozoica"; examinaron la concentración de iridio en rocas formadas entre el período Cretácico y el Terciario. El iridio constituye un indicador idóneo por su abundancia en la materia cósmica, en asteroides por ejemplo, mientras que su concentración en las rocas de la superficie terrestre es inferior en varios órdenes de magnitud.

La concentración de iridio en las rocas sedimentarias correspondientes al límite entre el Cretácico y el Terciario resultó ser tan alta que no se podía explicar mediante la acumulación gradual de materia extraterrestre, procedente de fuentes de "fondo", tales como micrometeoritos y polvo cósmico. Esas anomalías en la concentración de iridio se presentaron en más de 50 secciones geológicas, tomadas en lugares de todo el globo. Hecho que se interpretó suponiendo que el iridio se había depositado durante la colisión de un gran cuerpo cósmico contra nuestro planeta; el episodio desencadenaría los acontecimientos que terminarían con la extinción en masa de muchas de las especies que habían dominado la Tierra.



7. MOLECULAS EN CANTIDADES TRAZA detectadas mediante espectroscopía de ionización por resonancia. Un gas de baja densidad que contiene las moléculas que queremos detectar se pone en contacto con una superficie fría. Las moléculas colisionan con la superficie y son adsorbidas por ella, acumulándose con el tiempo. Se dirige un pulso de láser infrarrojo hacia la superficie, liberando la mayor parte de las moléculas adsorbidas y haciéndolas ascender como en una nube. Un pulso procedente de otro láser ioniza ciertas moléculas que, a continuación, se reúnen y clasifican según su masa. (Esquema de Andrew Christi.)

Pero caben otras hipótesis alternativas, de acuerdo con las cuales la anómala y elevada concentración de iridio y otros elementos, en la frontera entre el Cretácico y el Terciario, se deben a su concentración durante el curso de la sedimentación o a la actividad volcánica. Para corroborar estas hipótesis, importa determinar los valores precisos de las razones entre las concentraciones de varios elementos y sus isótopos en los sedimentos pertenecientes a este período; interesa, sobre todo, estudiar la concentración de los elementos del grupo de platino, que se caracteriza por una concentración alta entre la materia cósmica y baja en las rocas terrestres.

Hasta hace poco, era imposible determinar estas razones, pues se carecía de métodos fiables para medir la concentración de los elementos del grupo del platino en las rocas sedimentarias con una precisión mayor que una parte en 10^9. La única excepción era el iridio, que podía detectarse en concentraciones muy bajas, de una parte en 10^{11}, recurriendo al análisis por activación de neutrones.

Sin embargo, la espectroscopía láser de ionización por resonancia ha permitido determinar ya, con gran precisión, la concentración de cualquier metal del grupo del platino en muestras geológicas. Investigadores del Instituto de Espectroscopía y del Instituto V. I. Vernadsky de Geoquímica y Química Analítica de Moscú han establecido la razón entre las concentraciones de rodio e iridio en los sedimentos pertenecientes al límite entre el Cretácico y el Terciario, en un sector del valle del río Sumbar, en la República soviética de Turkmenistán. La razón entre la concentración de rodio y la de iridio en estas muestras se cifra en 0,34, con una incertidumbre de 0,06. Este resultado concuerda muy bien con las razones normalmente encontradas en los meteoritos (entre 0,3 y 0,6), pero difiere bastante de las proporciones que se dan en las rocas de la corteza (entre 1 y 6) y en el material del manto terrestre (entre 0,7 y 0,8).

Este resultado nos permite creer que las concentraciones de los elementos del grupo del platino en el tránsito del Cretácico al Terciario no se deben a la acumulación producida durante la sedimentación ni a la actividad volcánica. Antes bien, los resultados señalan de manera inequívoca que la anormalmente alta concentración de iridio tiene origen extraterrestre y refuerzan así la hipótesis de Alvarez y sus colaboradores: la anomalía del iridio sería una traza de la colisión entre un gran cuerpo cósmico y la Tierra. Determinando las razones entre las concentraciones de otros elementos del grupo del platino, cabría incluso la posibilidad de determinar qué cuerpo extraterrestre fue: una condrita (un meteorito rocoso), un meteorito de hierro, un cometa o cualquier otro tipo de objeto.

La espectroscopía de ionización por resonancia constituye una técnica poderosa y sugestiva. Con el tiempo, podría permitir que los investigadores dieran cumplimiento al reto formidable que un día propusiera el célebre físico soviético Peter L. Kapitza. En un discurso sobre el futuro de la ciencia, durante un simposio internacional en 1959, Kapitza instó al desarrollo de técnicas que "igualaran el sentido del olfato de un perro". Con la espectroscopía de ionización por resonancia será posible detectar moléculas con una precisión y una selección comparables sólo con los órganos olfativos de los mamíferos. En otras palabras, un analizador de olores mediante láser puede estar ya en puertas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

APPLICATIONS OF LASERS AND SPECTROSCOPY. Dirigido por L. Radziemski, R. Solarz y J. Paisner. Marcel Dekker, Inc., 1986.

LASER ANALYTICAL SPECTROCHEMISTRY. Dirigido por V. S. Letokhov. Adam Hilger, Ltd., 1986.

LASER PHOTOIONIZATION SPECTROSCOPY. Vladilen S. Letokhov. Academic Press, 1987.

Ciencia y sociedad

Transformación vegetal

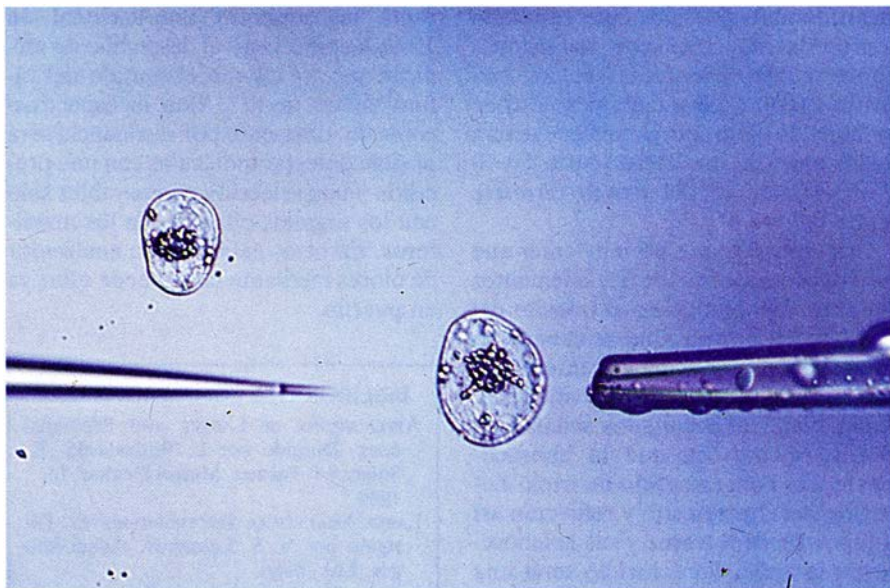
El empleo de vectores derivados de la bacteria patógena *Agrobacterium tumefaciens* ha convertido en procedimiento rutinario la introducción de genes externos en células vegetales. Esa bacteria transfiere al ADN nuclear de las plantas infectadas los genes que se haya insertado artificialmente en su plásmido *Ti* (por *tumor inducens*). Transferidos de ese modo, los genes se conservan, se expresan y se transmiten a las generaciones siguientes.

Merced a dicho procedimiento, se han transformado plantas dicotiledóneas (tabaco y petunia, por ejemplo) con genes bacterianos que les confieren resistencia a herbicidas y a plagas de insectos. La expresión de los genes foráneos está sometida al control de los promotores propios de la célula.

La transformación de las plantas monocotiledóneas, en cambio, exige aplicar estrategias distintas, pues la mayoría no es suscepible de infección por *Agrobacterium*. El procedimiento más común se inicia con la obtención de protoplastos, células a las que se ha eliminado la pared por digestión enzimática. Se introduce en los protoplastos el ADN de interés bañándolos en determinadas soluciones químicas, sometiéndolos o un campo eléctrico o inyectándoselo. Los protoplastos pueden fundirse entre sí, lo que posibilita mezclar variedades o especies, y con orgánulos celulares.

Seguidamente, esos protoplastos se cultivan y, a partir de un primer callo indiferenciado, se regenera la planta adulta. El aislamiento de protoplastos obtenidos de un mismo tejido y la posterior regeneración de ejemplares adultos revela la variabilidad genética que esconde un organismo, que puede explotarse con fines prácticos. Asimismo, la transformación de protoplastos permite estudiar los mecanismos de la transcripción y la traducción de los genes vegetales, las secuencias de ADN que participan en su expresión y el mecanismo de reconocimiento de las proteínas activadoras.

El perfeccionamiento de las técnicas en uso, junto con un mejor conocimiento de los procesos que rigen la expresión diferencial de los genes durante el desarrollo vegetal, abrirán el camino a la creación de nuevas e interesantes combinaciones genéticas. (E. Cervantes y J. G. De Diego.)



1. MICROINYECCION en un protoplasto de tabaco. Cortesía de E. Kranz, Instituto Max Planck, Colonia

Observatorio espacial europeo

La Agencia Espacial Europea, ESA, ha decidido este año dar luz verde a la construcción del que constituirá su mayor satélite científico: un telescopio infrarrojo montado sobre un observatorio que girará en órbita terrestre.

El proyecto del "Observatorio Espacial Infrarrojo", ISO, data de 1979. Desde entonces, numerosos estudios han demostrado el enorme interés científico de ese observatorio estelar extraterrestre y su viabilidad técnica. El éxito logrado en el desarrollo de sistemas ultrasensibles de detección y de otros novedosos instrumentos que habrán de funcionar en el vacío criogénico ha demostrado que las instituciones científicas y las empresas europeas están preparadas para construir el satélite. Cuando, en 1993, un cohete Ariane 44P ponga en órbita el ISO, habrá comenzado un nuevo capítulo de la astronomía de infrarrojo.

El satélite [*véase la figura 2*] viene a ser una gran vasija de refrigeración. En el interior, 2300 litros de helio superlíquido asegurarán que los instrumentos científicos y el telescopio de 60 centímetros se mantengan a −270 grados Celsius. Es preciso que la temperatura sea tan baja (sólo tres grados sobre el cero absoluto) para que a los sensores no les llegue radiación infrarroja (es decir, calorífica) emitida por el propio satélite.

El ISO cuenta con el único precedente del satélite infrarrojo IRAS, construido por Estados Unidos, Holanda y el Reino Unido. La exploración del firmamento que realizó en 1983 propició numerosos descubrimientos y, desde entonces, han derivado de ella fecundos programas astronómicos.

Los objetos celestes fríos, como los anillos de materia que rodean a las estrellas, sólo pueden observarse en la gama del infrarrojo. La luz de esas longitudes de onda atraviesa las nubes de polvo interestelares sin apenas debilitarse, gracias a lo cual podemos atisbar las zonas de nacimiento de estrellas y los núcleos de las galaxias. En el ámbito del infrarrojo se encuentran importantes líneas espectrales, moleculares y atómicas, que nos facultan para inferir la densidad, composición y contenido energético de diversos objetos celestes.

En órbitas de 90 minutos, el IRAS realizaba un barrido continuo del cielo infrarrojo en cuatro longitudes de onda (12, 25, 60 y 100 micrometros); el observatorio de la ESA podrá, en cambio, analizar con más detenimiento los objetos que se desee. El ISO podrá orientarse durante largos intervalos hacia determinadas fuentes, cuya radiación infrarroja representará y analizará; para ello, contará a bordo con cámaras fotográficas, fotómetros, polarímetros y espectrómetros.

Equipos científicos de distintos centros europeos preparan los cuatro experimentos que está previsto realizar

en el plano focal. Para cubrir el amplio intervalo de longitudes de onda que va de los 2,4 a los 180 micrometros se precisarán dos espectrómetros, que se cruzarán hacia los 45 micrometros. Los instrumentos básicos operan con rejilla de difracción y alcanzan resoluciones espectrales de valores cercanos a 1000, suficientes para distinguir las principales líneas espectrales; por ejemplo, a 157 micrometros, la "línea fría" del carbono de las nubes interestelares. A ambos espectrómetros puede acoplarse un interferómetro Fabry-Pérot, para incrementar la resolución hasta 10.000; así se detectan también los desplazamientos de la materia radiante debidos al corrimiento hacia el rojo, o líneas muy tenues, que de otro modo apenas destacarían del espectro continuo del polvo. Peter Clegg, del Queen Mary College de Londres, y un grupo de expertos de otros centros británicos, franceses, italianos y norteamericanos construyen el espectrómetro de onda larga (LWS). El de onda corta (SWS) lo está fabricando Thijs de Graauw, del Laboratorio de Investigaciones Espaciales de Groningen, Holanda. El interferómetro de ese aparato lo construye el grupo de Reinhard Genzel, del Instituto Max Planck de Física Planetaria, de Garching.

ISOCAM posibilitará la obtención de imágenes de gran resolución espacial en el intervalo de 2,5 a 17 micrometros. Con ese fin, y en colaboración con científicos de Francia, Escocia, Italia y Estados Unidos, Cathérine Cesarsky, del francés Instituto Saclay de Astrofísica, está fabricando sensores semiconductores monolíticos. Con esos dispositivos podrán buscarse, por ejemplo, estrellas con sistemas protoplanetarios de baja temperatura (entre −100 y 100 grados Celsius).

El cuarto aparato, el fotopolarímetro ISOPHOT [*véase la figura 3*], consta de cuatro subsistemas, de los que se obtendrá un rendimiento máximo por medio de exploraciones fotométricas de diversos tipos en el amplio intervalo de longitudes de onda que va de los 2,5 a los 200 micrometros. En particular, el espectro de los 100 a los 200 micrometros está aún sin explorar en su mayor parte, pues tampoco pudo observarse con el IRAS. En esas longitudes de onda tan largas pueden estudiarse las fuentes más frías, entre 15 y 30 grados Kelvin.

En ISOPHOT se utilizan cuatro cámaras, con las que podrán examinarse las zonas de formación continua de estrellas que se encuentran sumergidas en densas nubes de polvo y gas, zonas de nuestra Vía Láctea que no logran atravesar las señales luminosas. Los filtros de polarización permiten elegir un plano de vibración de la radiación y, con ello, medir la fracción no térmica de la radiación, como la radiación de sincrotrón que emiten las galaxias activas.

Gracias a su elevada sensibilidad a las bajas luminosidades de superficie, ISOPHOT puede emplearse también para mediciones espectrofotométricas del polvo interestelar. Pese a la ubicuidad del polvo por todo el universo, siguen sin aclararse sus propiedades y la composición de los granos. Apoyados en mediciones infrarrojas anteriores, se espera encontrar partículas de silicatos, hielo y alquitranes (sustancias aromáticas policíclicas).

La sensibilidad del ISO multiplicará por mil la alcanzada con los telescopios infrarrojos al uso, instalados a bordo de globos o de aviones. Ello se debe al empleo de nuevos sensores, fabricados con cristales de germanio o silicio, en cuya red se encuentran dispersos elementos "contaminantes" de los grupos vecinos en el sistema periódico; por ejemplo, átomos de fósforo (grupo V) en el cristal de silicio (grupo IV). Sin embargo, los átomos "dopantes" no encajan con exactitud en la retícula cristalina; y así, basta la escasa energía que proporciona la absorción de un fotón infrarrojo para desalojar el electrón de más del fósforo, con lo que el cristal aumenta su conductividad. Esa minúscula variación de la resistencia de los sensores semiconductores se lee por medio de silenciosos amplificadores mantenidos a 3 grados Kelvin, registrándose las más débiles señales infrarrojas (10^{-18} watt) del cosmos.

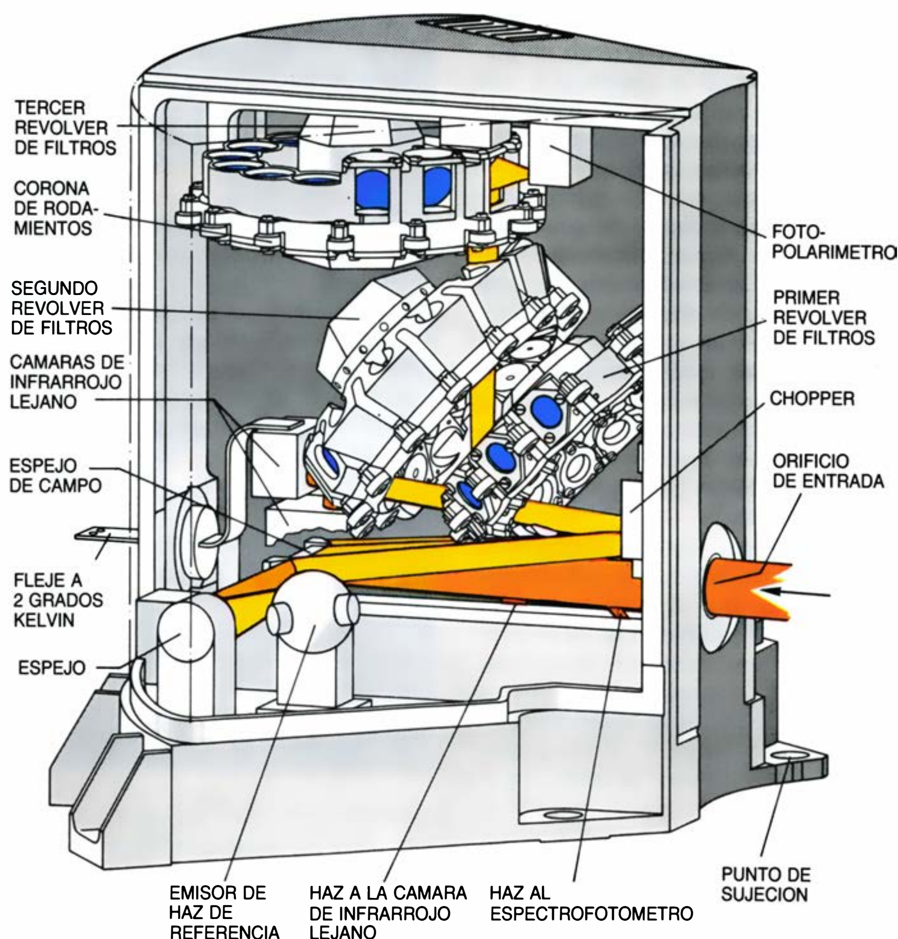
Para el nuevo intervalo del infrarrojo lejano, ISOPHOT utiliza cristales de galio (grupo III) dopados con germanio. Mediante un tornillo, los cristales se comprimen hasta casi su límite de rotura, con lo que la sensibilidad de los sensores se amplía, desde las longitudes de onda de unos 100 micrometros, hasta las de más de 200.

Además de los componentes electrónicos necesarios para operar en las proximidades del cero absoluto, ha habido que desarrollar mecanismos de criovacío de máxima fiabilidad. Los tres revólveres de filtros del ISOPHOT, que portan cada uno hasta 25 filtros, polarizadores y espejos, disponen para su movimiento de una potencia de sólo dos miliwatt. Pese a ello, se espera que el sistema se ajuste con gran precisión, que sea duradero y seguro y que no se resienta de las vibraciones que sufrirá durante su lanzamiento, cuando se le someterá a una aceleración 30 veces superior a la gravedad.



2. SATELITE ISO. Llevará a bordo 2300 litros de helio superlíquido a una temperatura de −271 grados Celsius (tanques azules). *Su telescopio de 60 centímetros, conjugado con cuatro aparatos científicos, constituirá un observatorio espacial infrarrojo, abierto a todos los astrónomos. La línea roja muestra la trayectoria que sigue un haz por el juego de espejos del telescopio. Un cohete Ariane-4 pondrá en órbita el satélite, que medirá más de cinco metros de altura y pesará 2,4 toneladas*

La mayoría de los desarrollos técnicos de los que se beneficiarán los experimentos son fruto de la colaboración entre centros públicos de investigación y la industria privada. En ISOPHOT han colaborado el Instituto Max Planck de Astronomía, Radioastronomía y Física Nuclear y centros británicos, daneses y españoles. La construcción de las unidades de vuelo del experimento corre a cargo de Dornier System, Carl Zeiss, Battelle e IMEC. La gestión industrial cuenta con el apoyo del organismo público alemán de investigaciones y ensayos aéreos y espaciales (DFVLR). ESA ha confiado la fabricación del satélite a un equipo industrial repartido por toda Europa y dirigido por la francesa Aérospatiale, de Cannes. En Alemania se producirán algunos componentes de interés tecnológico, como el conjunto refrigerador de helio (que fabricarán MBB y Linde), las células solares (AEG) y el espejo ligero (Heraeus).



3. EXPERIMENTO ISOPHOT, en el que, girando tres revólveres, podrá obtenerse un gran número de configuraciones de los instrumentos de observación. La prueba prevé tomar imágenes con cámaras de infrarrojo lejano y realizar mediciones polarimétricas y espectroscópicas. El aparato estará provisto de 223 sensores extremadamente sensibles, algunos de los cuales deberán mantenerse a una temperatura de trabajo de 2 grados Kelvin, para lo cual deberán conectarse al tanque de helio a través de un cable de cobre de gran pureza. ISOPHOT es uno de los cuatro ensayos de plano focal que se realizarán a bordo del satélite ISO; situados detrás del espejo principal, los instrumentos muestrearán un segmento de 80 grados

En la estación receptora que la ESA tiene en Villafranca, Madrid, se instalará el observatorio terrestre del ISO. Según se ha decidido hace poco, el satélite seguirá una órbita diaria muy excéntrica, cuya máxima distancia a la Tierra será de 70.000 kilómetros; de ese modo, los experimentos quedarán en gran medida a salvo del cinturón de radiación del planeta y podrán realizarse mediciones hasta 22 horas al día durante toda la misión, que debe durar por lo menos 18 meses.

Los rápidos avances registrados por las técnicas de transmisión de datos, así como las amplias conexiones informáticas mundiales, harán innecesaria la presencia de los observadores en la estación terrestre: podrán pedir los resultados desde sus respectivos centros. Se reservará un tercio del tiempo de la misión a los centros que participan en la construcción; los dos tercios restantes quedan a la disposición de astrónomos europeos y norteamericanos.

El observatorio espacial infrarrojo permitirá estudiar cualquier tipo de objetos astronómicos. En nuestra propia vecindad, podrá descubrirse la salida de cometas de la nube de Oort hacia el Sol. Punto fundamental del proyecto será la búsqueda de la materia galáctica cuya existencia predice la teoría pero que aún no ha logrado detectarse. Si se trata de materia ordinaria, deberá ser fría e invisible. Entre los posibles candidatos se cuentan las estrellas que, por no haber alcanzado el tamaño suficiente, carecen de fuente energética nuclear y las estrellas agotadas.

Otro amplio campo de investigación son las galaxias en evolución. Cuando, en su migración espacial, las galaxias se aproximan lo suficiente, coinciden muchas nubes de gran densidad y se forman numerosas estrellas. Esos astros, jóvenes y calientes, caldean los restos de nubes que les rodean. Las galaxias emiten entonces la mayor parte de su energía en la gama electromagnética del infrarrojo lejano.

ISOPHOT permitirá aprovechar el tiempo que en otros satélites suele perderse durante el cambio de observación de un objeto a otro. Durante ese intervalo, la cámara de 200 micrometros examinará todas las fuentes que atraviesen el campo visual. Ese muestreo estocástico cartografiará gran parte del firmamento en la gama de la onda larga y ofrecerá un valioso complemento al catálogo de las fuentes más frías obtenido con el IRAS. (Dietrich Lemke, director científico del experimento ISOPHOT. Instituto Max Planck de Astronomía de Heidelberg.)

Caldeamiento postprandial

¿Despierta el apetito tomar un baño de agua caliente? En el caso de ciertos peces parece que sí. Según un trabajo que publica *Nature*, los esculpines juveniles del lago Bear (Utah e Idaho) se alimentan durante el día en las aguas gélidas del fondo y ascienden de noche a la superficie, más caliente, para digerir. El agua caliente acelera el ritmo con que absorben el alimento y les permite ingerir más cantidad de comida el día siguiente.

Entre los peces no son raras las migraciones verticales diarias, pero los motivos suelen ser otros. Por ejemplo, suben por la noche a alimentarse de plancton y retornan de día a las profundidades, para esconderse de los depredadores y aprovechar las bajas temperaturas para retardar el metabolismo. Los autores del artículo, Wayne A. Wurtsbaugh y Darcy Neverman, de la Universidad estatal de Utah, creían que los esculpines practicaban también una pauta migratoria de ese tipo hasta que descubrieron que los peces tenían el estómago lleno al atardecer, justo antes de ascender a la superficie. El contenido estomacal eran restos de organismos que habitan sólo en el fondo o cerca. Puesto que no subían a comer, quizá lo hacían para digerir.

Para verificar la hipótesis según la cual el agua caliente ayuda a la digestión, los investigadores dieron de comer a un grupo de esculpines y los separaron en dos tanques, uno con agua a cinco grados Celsius (la temperatura del ambiente bentónico) y otro con agua a a 15 grados Celsius (la de la superficie de noche). Los ejemplares mantenidos a 15 grados digirieron el contenido estomacal a un ritmo del 23 por ciento cada hora y habían evacuado

el 80 por ciento del ágape al cabo de 7 horas y media. Los que se mantuvieron a cinco grados sólo digerían cada hora un 3,2 por ciento del contenido estomacal; con ese ritmo habrían tardado 50 horas en evacuar el 80 por ciento de la comida.

¿Qué beneficio obtiene el pez de incrementar el ritmo digestivo? No se olvide que en aguas calientes el mero mantenimiento del metabolismo consume más energía. Para hallar la respuesta, Wurtsbaugh y Neverman criaron en el laboratorio por separado dos grupos de peces. Unos crecieron en agua mantenida constantemente a una temperatura de cinco grados; los otros se sometieron a variaciones térmicas diarias entre cinco y 15 grados, que simulaban la gama de temperaturas en que viven los peces migradores. Sólo se les dio alimento durante el día. Los resultados fueron espectaculares: los esculpines que crecieron en aguas de temperatura oscilante triplicaron la velocidad de desarrollo de los peces mantenidos a baja temperatura.

Lluvia de estrellas

Los majestuosos brazos de las galaxias espirales han atraído desde siempre la atención de los astrónomos. Y ello por varias razones. En primer lugar, albergan gran cantidad de estrellas recién nacidas. ¿Aparecen ahí esas estrellas por el motivo único de que en los brazos abundan las nubes de gas que constituyen la materia prima de la génesis estelar? ¿Acaso desempeñan también algún papel en su nacimiento? Recientes observaciones de gran resolución, de la galaxia del Torbellino, el arquetipo de las espirales, realizadas en la banda milimétrica de radioondas, dibujan un cuadro que apoya firmemente la última hipótesis. Según parece, el campo gravitatorio de los brazos galácticos propicia la formación estelar.

Los estudios, que sus autores, Stuart N. Vogel, del Instituto Politécnico Rensselaer, y colaboradores, presentan en *Nature*, se llevaron a cabo en el Radioobservatorio del Valle Owens, California, utilizando la técnica de radiointerferometría. La galaxia del Torbellino dista más de 30 millones de años-luz, pese a lo cual, registrando las emisiones características de los elementos y compuestos químicos que forman los brazos galácticos, los autores han trazado un puntilloso mapa de posiciones y velocidades. Se trata del examen más preciso de una galaxia realizado hasta la fecha.

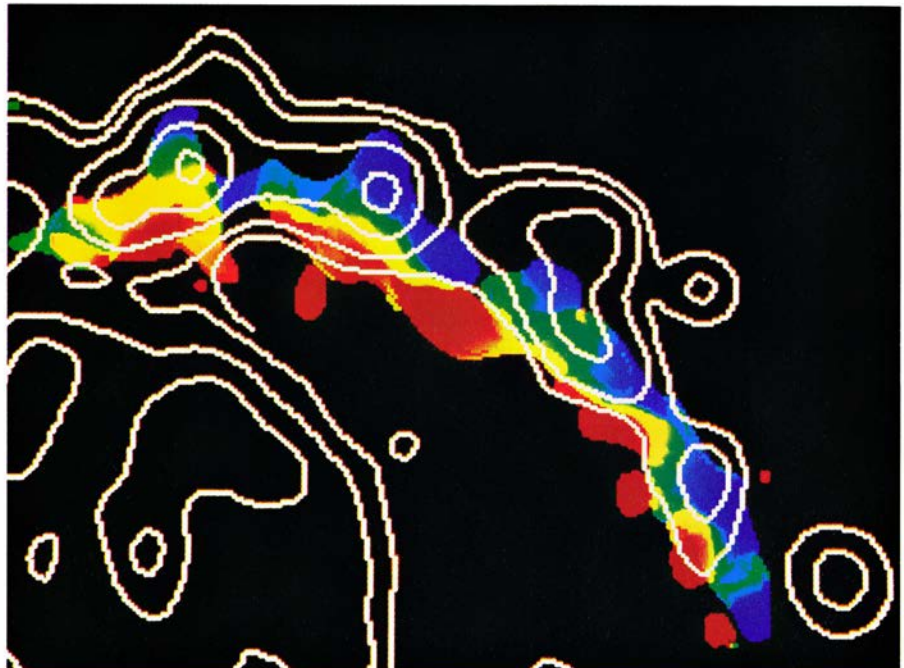
Como esperaban, los científicos encontraron que las nubes de gas molecular (principalmente hidrógeno) a partir del cual van coalesciendo las estrellas se concentran en los brazos espirales, que también presentan las mayores densidades de polvo y estrellas. Más importante: los atrónomos descubrieron que el gas parece girar alrededor del núcleo galáctico más deprisa que los propios brazos, fenómeno predicho ya por algunos modelos. Cuando las nubes alcanzan un brazo y penetran en él, su velocidad cambia violentamente y sufren una desviación centrípeta a lo largo del brazo, provocada por el campo gravitatorio de éste. Ese efecto confirma a su vez la mayor densidad de los brazos galácticos: las "ondas de densidad" espirales que las teorías de la génesis de galaxias postulan.

Sin embargo, la observación más importante fue que las estrellas de gran masa recién formadas, que se distinguen por su superficie de hidrógeno ionizado, no se concentraban exactamente en los brazos, sino algo desplazadas a "sotavento". La sobreabundancia de estrellas jóvenes detrás mismo de los brazos superaba la cuantía prevista teniendo en cuenta sólo la alta concentración de nubes de gas molecular generadoras de estrellas que allí regía. Según la explicación más probable, el choque gravitatorio que sufrían las nubes de gas molecular al entrar en el brazo iniciaba la formación estelar y los nuevos cuerpos aparecían a sotavento 30 millones de años después del encuentro entre el gas y el brazo espiral.

En opinión de Vogel, su equipo no está capacitado para justificar que la entrada de las nubes de gas en los brazos desencadene la formación de estrellas, aunque acepta la posibilidad de que el campo gravitatorio del brazo las aproxime entre sí y eleve su frecuencia de choque mutuo. Esas colisiones incrementarían la masa de las nubes y provocarían algún que otro colapso estelar. En todo caso, Vogel señala que los brazos no pueden ser los únicos progenitores de la formación estelar, pues algunas galaxias carecen de ellos.

Regeneración ósea

Hasta hace poco, la mayoría de los que padecían un acortamiento de los huesos por causas accidentales, trastornos genéticos o enfermedad disponían de escasos recursos terapéuticos. El procedimiento habitual de alargar el hueso, que obliga a cortarlo y cubrir el hiato con hueso de otra parte del cuerpo o de un donante, constituye una operación traumática que no puede aplicarse a todos los pacientes. A veces, el hueso añadido no se amalgama con el antiguo; tampoco los tejidos blandos que rodean la estructura pueden acomodarse a un alargamiento excesivo. Está empezando a aplicarse ahora una técnica de alargamiento óseo



4. DOS BRAZOS de la galaxia del Torbellino, recogidos en una imagen compuesta. La galaxia gira en sentido contrario al de las agujas del reloj; los colores denotan las velocidades relativas de las nubes moleculares. Las velocidades cambian en las cercanías de las ondas de densidad. Las curvas de nivel señalan las emisiones procedentes del hidrógeno ionizado, que revela la formación de estrellas por detrás de la onda de densidad



5. TECNICA DE ALARGAMIENTO DEL HUESO diseñada por Gavriel A. Ilizarov. La imagen muestra su aplicación a un paciente por cirujanos del Hospital Clínico Sudoccidental de la Universidad de Texas en Dallas

que, desarrollada en la Unión Soviética hace 40 años, no se había ensayado en Occidente hasta esta década. El método, que se ha bautizado con el nombre del médico soviético que lo diseñó, Gavriel A. Ilizarov, aprovecha la capacidad del hueso y del tejido blando de crecer en respuesta a la tensión.

El procedimiento ideado por Ilizarov comienza con una operación relativamente sencilla, según explica Dror Paley, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Maryland en Baltimore, uno de los introductores del método en los Estados Unidos. Por regla general, el cirujano comienza por insertar agujas flexibles en los extremos del hueso. Las agujas se disponen cual si irradiaran del miembro y se sujetan a dos anillos, a su vez conectados por pernos de longitud ajustable. Seguidamente, en un punto situado entre los dos anillos, el cirujano practica un corte alrededor del hueso. La incisión debe ser suficientemente profunda para que el hueso se separe ligeramente al tirar de los extremos, pero sin que llegue a lesionar la médula, que nutre al tejido óseo.

Ajustando los pernos, el paciente o el médico pueden estirar el hueso que queda entre los anillos. El crecimiento en la zona de la primera incisión puede ser de hasta un centímetro cada 10 días; tarda el doble en endurecerse.

Paley afirma que el aparato sirve asimismo para enderezar los huesos, igual que las prótesis ortodónticas que se aplican a los dientes. Por supuesto, la colocación del aparato presenta algunos inconvenientes. Los hierros que atraviesan la piel pueden provocar infecciones y, a menudo, la extremidad que se somete a estiramiento duele. Victor H. Frankel, del Instituto Ortopédico de Afecciones Articulares, de Nueva York, opina que, pese a ello, el procedimiento ha demostrado ser menos traumático y peligroso que el injerto óseo y otras formas de cirugía ortopédica mayor.

Ilizarov y otros cirujanos soviéticos y del bloque oriental que practican esa técnica han realizado más de 500.000 operaciones durante las últimas décadas y han publicado innumerables trabajos. ¿Por qué ha tardado tanto en adoptarla la medicina occidental? Según Frankel, porque "la bibliografía original estaba redactada en ruso y la técnica se desarrolló en una pequeña ciudad de la Siberia occidental". Frankel conoció el procedimiento en 1984 y lo aplicó por primera vez hace menos de dos años. "Sinceramente, al principio parecía un poco increíble."

Ciencia y empresa

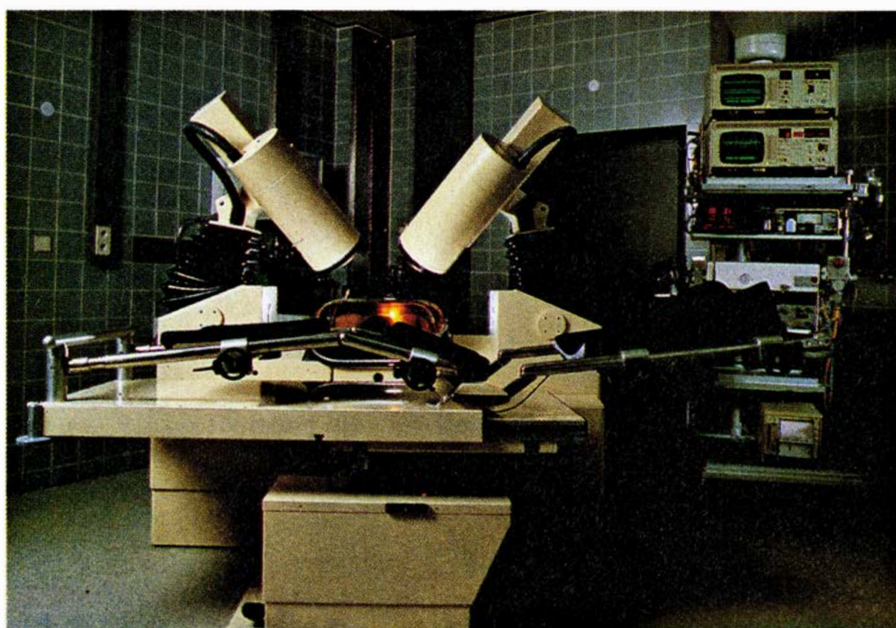
Nuevos aparatos médicos

Durante 1989, en la Clínica Mayo de Rochester, Minnesota, 20 pacientes a los que se les operará la columna vertebral participarán en el ensayo de un nuevo dispositivo de control de la capacidad motora, que estimula el cerebro para que active los músculos de las extremidades. En Baltimore, ocho diabéticos del Centro de Diabetes Johns Hopkins no necesitan ya inyectarse la dosis diaria de insulina: se les ha implantado una bomba experimental que suministra la hormona.

Esos ingenios pueden considerarse la prolongación de otros aparatos médicos, en particular los marcapasos, pero su gestación ha sido muy distinta de la de éstos. A finales de la década de 1950, Wilson Greatbatch estudiaba en un granero los proyectos del primer marcapasos implantable funcional; se gastó 2000 dólares de su peculio para financiar los trabajos. En la actualidad, los investigadores suelen colaborar con empresas; el lanzamiento de un nuevo instrumento al mercado exige inversiones de millones de dólares y los trabajos se prolongan varios años. El cambio refleja en buena medida la creciente complejidad de los procesos reguladores que deben superar los aparatos.

En 1976, preocupado por la seguridad de los equipos más complejos de uso en medicina, el Congreso de los Estados Unidos dio poderes al organismo público de inspección de alimentos y medicamentos (la Food and Drug Administration, FDA) para que, igual que los productos farmacéuticos, regulara esos aparatos (desde analizadores hasta aparatos de rayos X). Las regulaciones obligan a que los fabricantes de aparatos que puedan constituir un riesgo para los pacientes demuestren su seguridad y eficacia mediante una serie de ensayos clínicos. Están exentos de esa obligación, hasta que la FDA evalúe los datos reunidos sobre ellos, los instrumentos médicos aparecidos en el mercado antes de la ley de 1976 y los que, habiéndolo hecho después, se consideran "sustancialmente equivalentes".

A veces, la colaboración con las empresas se inicia no teniendo los científicos más que una idea sobre el aparato. David R. Holmes, Jr., cardiólogo de la Clínica Mayo, ha dedicado mucho tiempo al ensayo de procedimientos para liberar las válvulas aórticas de depósitos que las obstruyan. Uno de sus últimos proyectos consiste en encontrar la frecuencia de resonancia de los depósitos, enfocar en ellos ondas acústicas y y confiar en que se deshagan. Un fabricante californiano ha respondido con gran entusiasmo y Holmes le está mandando muestras de los depósitos para que los ingenieros de su empresa diseñen el aparato.



LITOTRIPTOR fabricado por la empresa alemana occidental Dornier, que deshace los cálculos renales sometiéndolos a haces de ultrasonidos.

Otros autores colaboran con consorcios industriales. Por ejemplo, en el desarrollo de la bomba de insulina del Johns Hopkins, de tipo implantable y programable, se decidió que Pacesetter Systems, de Sylmar, California, fabricara y comercializara la bomba y que otras dos compañías se encargaran de desarrollar los sistemas de manejo del fluido y de refinar la variedad de insulina que se infunde.

Suelen iniciarse los ensayos preclínicos (por regla general con animales) cuando se considera que están a punto las técnicas que interesa, y se prolongan hasta que la experiencia acumulada se juzga suficiente para garantizar las pruebas en humanos. Christopher D. Saudek, director del Centro de Diabetes Johns Hopkins, supervisó los cinco años de ensayos en animales a que se sometió la bomba implantable de insulina. Algunas empresas aprovechan los estudios con animales realizados en otros países. Ese fue el procedimiento que siguió la división médica de Dornier, de Alemania Occidental, cuando introdujo en Estados Unidos su aparato de litotricia, que deshace los cálculos renales dirigiendo ultrasonidos contra ellos. Cuando Dornier formuló la petición de iniciar ensayos clínicos en los Estados Unidos, el equipo ya contaba con permiso para comercializarse en Alemania.

Antes de iniciarse los ensayos clínicos con humanos, debe obtenerse la aprobación del correspondiente consejo institucional de supervisión y, posteriormente, la de la FDA; el proceso puede resultar muy largo. Desde hace un año, en el laboratorio de Jasper R. Daube, neurofisiólogo de la Clínica Mayo, aguarda un estimulador magnético de músculos y nervios. Cuando se maneja cerca del brazo del paciente, el estimulador provoca contracciones. Su aplicación más interesante, dice Daube, sería controlar las vías motoras que estimulan el cerebro. Confía en que, con ello, el estimulador colabore en la valoración de las lesiones de la coordinación motora (y de la probabilidad de quedar paralítico) de los pacientes que se someten a cirugía de la espina dorsal bajo anestesia. En Europa, el dispositivo se ha empleado ya en miles de pacientes para estimular el cerebro; pese a ello, el consejo de revisión de la Clínica Mayo actuó con cautela: para obtener el permiso, Dau-

be tuvo que revisar varias veces los protocolos del ensayo. Por su parte, la FDA exigió revisiones adicionales.

La experiencia de Daude no es excepcional. La FDA suele devolver un 60 por ciento de las peticiones de aprobación de ensayos en humanos que le llegan. En función del aparato, las pruebas clínicas pueden prolongarse desde unos pocos meses hasta varios años. En noviembre de 1986 Saudek implantó en un paciente su primera bomba de insulina programable; las pruebas se han ampliado ahora para ensayar diversas localizaciones. Hasta la fecha, el proyecto ha costado 15 millones de dólares; los representantes de Pacesetter Systems no quieren declarar a cuánto asciende el presupuesto total.

Una vez concluidos los ensayos clínicos, se entregan los datos a la FDA, para que conceda un "permiso de precomercialización", con el que ya puede ponerse el producto a la venta. Según Charles H. Kyper, director del equipo que concede los permisos, muy pocas peticiones, las más sencillas, superan a la primera el examen de la FDA. Y agrega que, tras la presentación de los datos clínicos, suele tardarse unos 15 meses en obtenerlo, tiempo que en su mayor parte lo ocuparía la empresa solicitante en recolectar más datos, pues la FDA está obligada a pronunciarse en 180 días. En la primera mitad del año fiscal de 1988, ese organismo inspector ha recibido unas 110 peticiones; Kyper considera que antes de final de año se habrá dado luz verde a unas 50.

Lo probable es que las diversas secciones de que conste una petición se sometan a la evaluación de expertos distintos. Se complica más aún el juicio cuando en la petición se describe conjuntamente un aparato y un fármaco, como es el caso de la aplicación de la litotricia a los cálculos biliares.

En el procedimiento litotrícico habitual, los pacientes se desprenden sin mayores consecuencias de los fragmentos de los cálculos renales; pero la arenilla que se acumula en el conducto biliar puede causar serios trastornos, incluso ictericia. Por ello, la terapia contempla la administración de un agente químico que disuelva los restos. La FDA ya ha concedido permiso para la libre comercialización del fármaco en uso independiente; mas, para determinar si puede aplicarse sin riesgo en la litotricia, deben trabajar conjuntamente los inspectores de las divisiones de aparatos y de fármacos.

No obstante la dificultades que entraña el desarrollo de aparatos médicos hasta su comerialización, tanto fabricantes como clínicos recuperan con creces lo que le hayan dedicado. Eric B. Rosenbaum, consultor de Arthur D. Little, estima que los hospitales gastaron el año pasado unos 7000 millones de dólares en equipos de diagnóstico y terapia, como aparatos de resonancia magnética, marcapasos y catéteres de balón. Los hospitales no lucrativos, en particular la Clínica Mayo y el Johns Hopkins, están creando divisiones que sí reparten beneficios, en parte para explotar lo que rinda la comercialización de las ideas de sus investigadores.

Megaproyectos

En la carrera por construir una industria de circuitos integrados, Europa parecía condenada a ocupar plaza de reserva. Según Dataquest, empresa de estudios de mercado de San José, California, el año pasado las empresas europeas sólo poseían el 10 por ciento del mercado mundial de semiconductores; pero la situación parece estar cambiando.

En 1984, Siemens, de Alemania Occidental, y Philips, de Holanda, se embarcaron en un programa de cinco años, el Proyecto MEGA, para desarrollar y fabricar dispositivos de memoria avanzados. El año próximo, según lo previsto, las dos empresas producirán gran cantidad de pastillas desarrolladas en el marco del proyecto.

Las pastillas de memoria, esenciales en los dispositivos electrónicos, constituyen desde hace tiempo el pilar de la industria de los semiconductores. Las pastillas de memoria típicas presentan un diseño muy regular, por cuya razón, aplicando técnicas de fabricación eficientes, se reducen notablemente los costos. Hace dos años, en plena disputa comercial entre Japón y Estados Unidos, la feroz competencia que plantearon los fabricantes japoneses apartó del juego a todas las empresas estadounidenses implicadas, salvo dos. Las compañías americanas, con ayuda de su gobierno, crearon entonces el proyecto SEMATECH, para mejorar las técnicas de fabricación de pastillas. Robert N. Noyce, coinventor del circuito integrado, ha aceptado recientemente la dirección del proyecto.

Tanto la industria como las administraciones europeas "ven la necesidad de poseer industria microelectrónica propia", afirma Hans Meyer, director delegado en Siemens y uno de los gestores del Proyecto MEGA. "Cuando nos comparamos con los japoneses, o ahora con el SEMATECH norteamericano, entendemos que hay que hacer algo. De ese mismo parecer son los gobiernos."

En primer lugar, Siemens y Philips acordaron centrarse en la fabricación de pastillas de memoria de acceso aleatorio dinámicas y estáticas, respectivamente DRAM y SRAM. (Las SRAM son más rápidas y caras que las DRAM.) Los proyectos de las pastillas y de los procesos de manufactura los realizaron conjuntamente ingenieros de Siemens y de Philips, pero cada compañía tiene previsto desarrollar un dispositivo distinto. Siemens obtendrá DRAM de cuatro megabit y Philips SRAM de un megabit. A principios de este año Siemens empezó la producción en masa de una DRAM de menos capacidad: una pastilla de un megabit basada en tecnología de Toshiba. Meyer opina que, cuando, a principios de 1989, dé comienzo la producción de las DRAM mayores, y de las SRAM de Philips, el Proyecto MEGA habrá cumplido su objetivo.

¿Y después? Las mismas Siemens y Philips estudian un proyecto más ambicioso aún: la Iniciativa Europea Conjunta de Silicio Semiconductor (JESSI). En vez de fabricar unos pocos tipos de pastilla, con JESSI se pretende obtener una familia de pastillas de memoria de 16 y de 64 megabit. Meyer estima que en la planificación de JESSI han participado un centenar de compañías europeas, incluidas algunas que producen equipos de fabricación de pastillas. R. Hamersma, director general de la división de componentes de Philips, considera que la dirección del proyecto probablemente corresponderá a Siemens, Philips y la francesa SGS-Thomson. Se espera asimismo la colaboración financiera de las administraciones públicas.

Ese tipo de programas no son baratos. En el Proyecto MEGA Siemens habrá invertido unos 2500 millones de marcos alemanes y Philips más de 2000 millones. Las administraciones alemana y holandesa han aportado, conjuntamente, otros 480 millones de marcos. Según Hamersma, los primeros planes de JESSI prevén un desembolso de hasta 6500 millones de marcos entre 1989 y 1996.

Ante la perspectiva del mercado único europeo, "muchos consideran, opina Meyer, que JESSI podría constituir el primer paso del desarrollo de algo de industria común. Pero ése no es el objetivo principal". De lo que se trata es de crear una potente industria microelectrónica europea.

La fábrica de insulina

La célula beta pancreática constituye un centro de producción de insulina. Nuevas técnicas de investigación dan una visión sin precedentes de la elaboración de la hormona y de su trayectoria hacia la sangre

Lelio Orci, Jean-Dominique Vassalli y Alain Perrelet

Cada célula del cuerpo humano es como una planta industrial. Entre los muchos productos elaborados en ellas se encuentran las hormonas: proteínas mensajeras que llevan instrucciones, a través de la sangre, de su lugar de fabricación a otras células del organismo, donde regulan diversas funciones. Una de estas hormonas es la insulina, cuya misión principal consiste en controlar el transporte de la glucosa, desde el torrente sanguíneo hasta las células, donde es oxidada. La glucosa es, a su vez, la fuente más importante de energía para el organismo. La deficiencia en insulina daña la capacidad de las células de captar glucosa, lo que provoca que ésta se acumule en la sangre y aparezca la diabetes, más específicamente la de tipo I o insulino-dependiente. Una diabetes incontrolada puede tener consecuencias devastadoras para los ojos, riñones y vasos sanguíneos, amén de rebajar, sin ninguna duda, la esperanza de vida.

Dada la importancia que reviste la insulina, conviene conocer cómo se fabrica esta hormona y se exporta a la sangre. Durante 20 años, nuestro laboratorio de la Universidad de Ginebra se ha dedicado, con especial ahínco, al estudio de la "fabrica" de insulina. Centramos nuestra investigación en la elaboración, procesamiento y secreción de la hormona. Ahora bien, por tratarse de una proteína, la descripción de la producción de insulina puede servir de modelo del proceso de secreción seguido por otras muchas proteínas en distintas células del organismo.

¿Dónde fabrica el cuerpo la insulina? La pregunta recibió ya una respuesta parcial hace un siglo. En 1889, dos fisiólogos alemanes, Joseph von Mering y Oscar Minkowski, demostraron, con una serie de experimentos que se han hecho clásicos, que la extirpación del páncreas conduce a la diabetes; el páncreas es una glándula ubicada en el abdomen, que libera enzimas digestivas al intestino. Experimentos posteriores, en el primer cuarto de nuestro siglo, revelaron, sin embargo, que la lesión del páncreas no producía siempre diabetes: la enfermedad se evitaba cuando unas células especiales, agrupadas en "isletas" y que no contenían enzimas digestivas, quedaban sin dañar. Estos agrupamientos celulares en forma de isletas habían sido descubiertos en 1869 por Paul Langerhans, un estudiante alemán de medicina en cuyo honor se les denomina hoy islotes de Langerhans.

El misterioso factor que prevenía la diabetes y que manifiestamente procedía de los islotes, recibió el nombre de insulina, del latín *insulae*, o islas. Esta hormona fue aislada en 1921 por Frederik G. Banting y Charles H. Best y sus colegas James J. R. Macleod y James B. Collip, de la Universidad de Toronto; en 1922 se llevó a cabo el primer tratamiento de un diabético con insulina pura.

Así, pues, a principios de siglo habíase determinado, en los islotes de Langerhans, el lugar del organismo donde se produce la insulina. Aunque aproximadamente hay un millón de islotes repartidos por todo el páncreas, sólo representan alrededor del uno por ciento del peso total de este órgano. No obstante esa escasez, los islotes pancreáticos desempeñan un papel importante en el control del metabolismo; además de insulina, producen otras tres hormonas: glucagón (una proteína que antagoniza la acción de la insulina y eleva los niveles de glucosa en la sangre), polipéptido pancreático (que regula la liberación de las enzimas digestivas pancreáticas) y somatostatina (una proteína que inhibe la secreción de las restantes hormonas de los islotes).

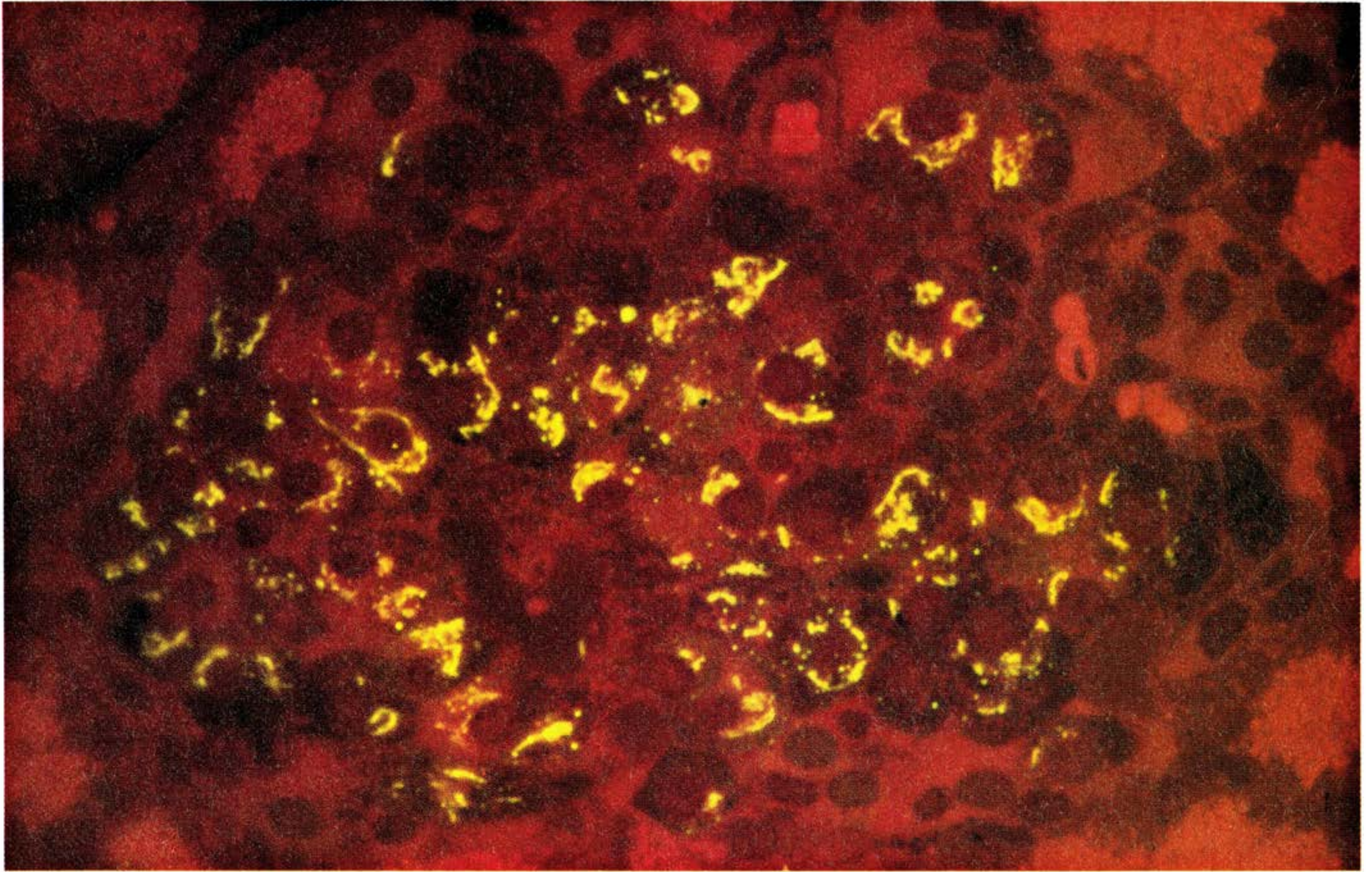
Cada islote de Langerhans aloja unas 3000 células productoras de hormonas. Mediante la exposición de cortes de dichos islotes a anticuerpos que reconocen específicamente las diversas hormonas, reforzada por el marcaje de cada uno de estos anticuerpos con una molécula fluorescente, se ha demostrado que cada hormona se sintetiza en un tipo diferente de célula. Las productoras de insulina, conocidas como células beta, constituyen más del setenta por ciento de la población celular de los islotes y segregan la hormona directamente a la circulación sanguínea. De esta forma de secreción se dice que es endocrina; llámase exocrina la secreción a través de un conducto (tal y como el páncreas segrega sus enzimas digestivas al intestino).

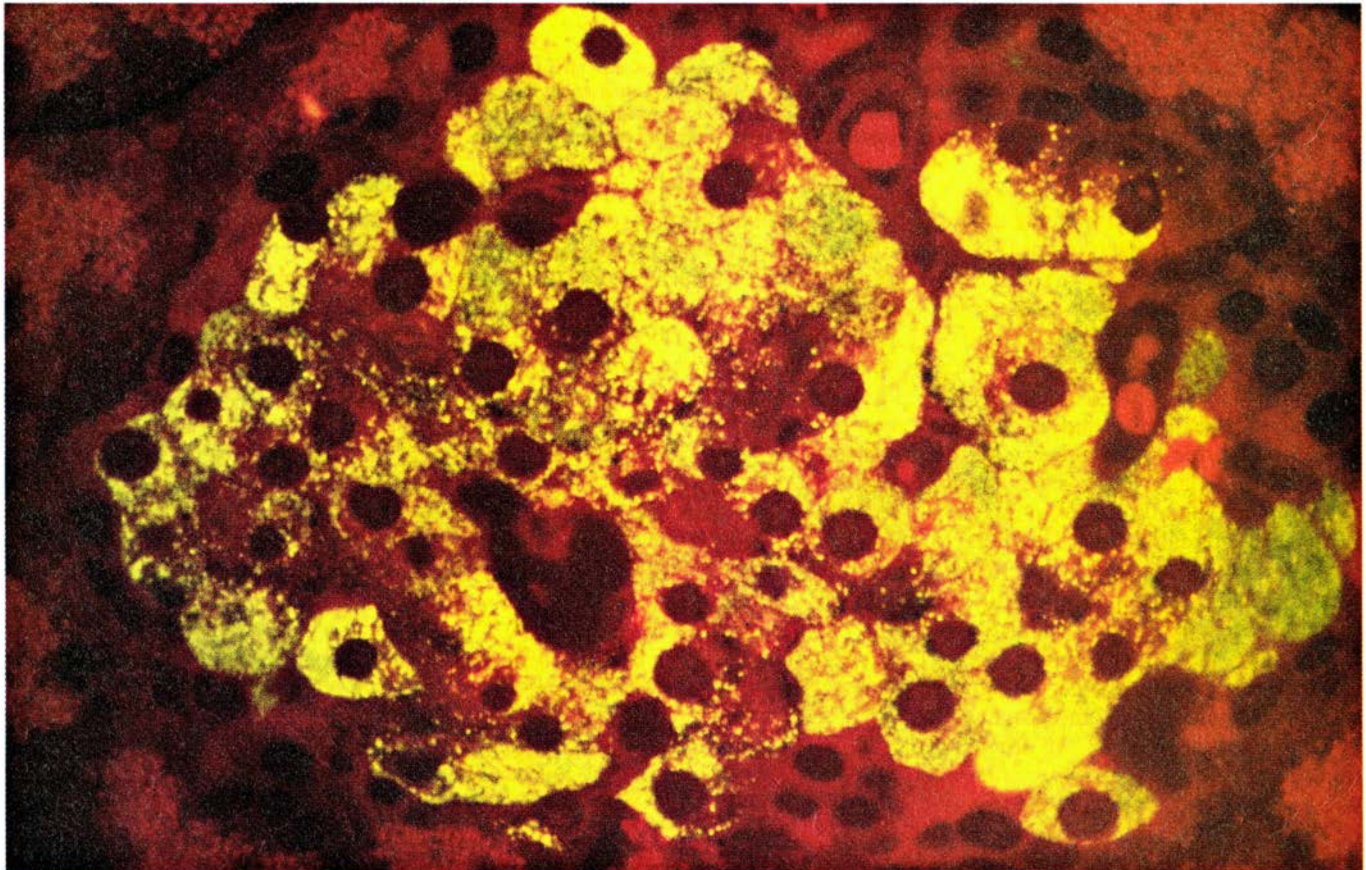
Síntesis de proteínas

La síntesis de cualquier proteína comienza en el núcleo celular con la activación de un fragmento de ADN el gen que determina la composición de la proteína. El gen se copia en una banda de otro ácido nucleico, el ARN. Este, a su vez, se procesa y origina el ARN mensajero, que se exporta al citoplasma celular. Allí sirve de molde para la síntesis de proteínas: imparte órdenes a unos pequeños cuerpos densos, los ribosomas, para que engarcen los aminoácidos siguiendo una secuencia definida y formar así la cadena proteica predeterminada.

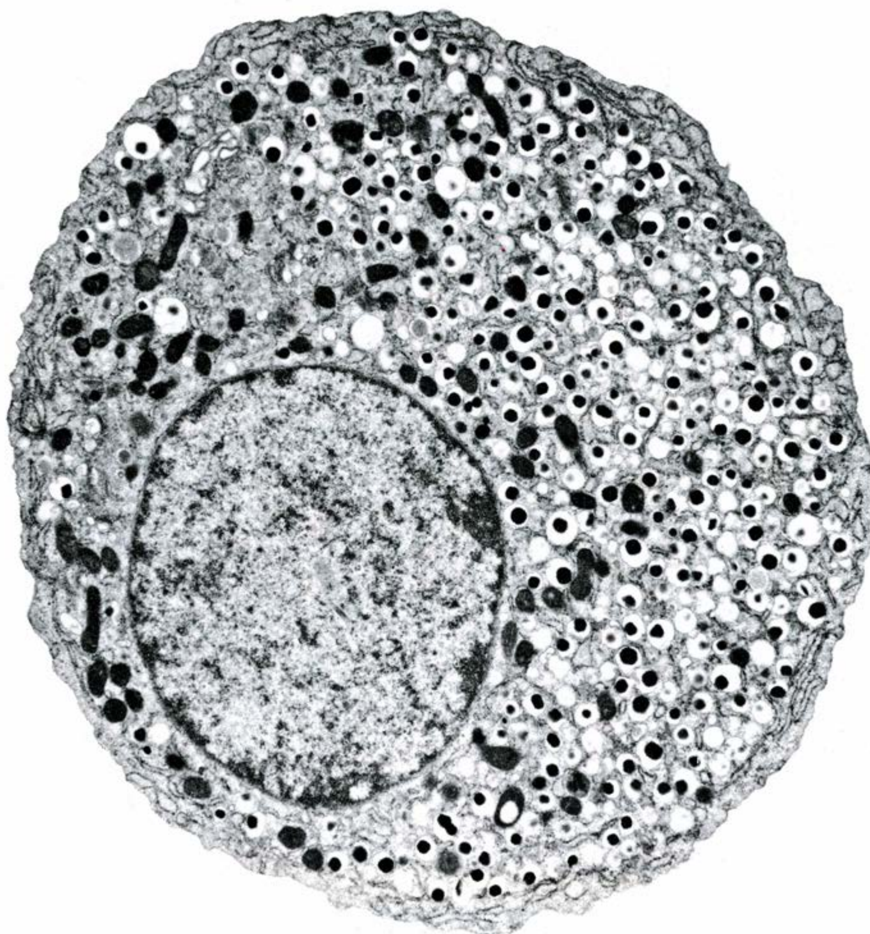
La proteína segregada por las células

LELIO ORCI, JEAN-DOMINIQUE VASSALLI y ALAIN PERRELET son profesores de histología y embriología de la facultad de medicina de la Universidad de Ginebra. Orci, que se doctoró en medicina en 1964 en la Universidad de Roma, se incorporó dos años más tarde a la Universidad de Ginebra, cuyo departamento de morfología dirige. Vassalli nació en Ginebra, donde se licenció en medicina en 1972. Permaneció nueve años en la Universidad Rockefeller, que le otorgó el doctorado en bioquímica antes de regresar a Ginebra. Perrelet es también de Ginebra; en su alma mater estudió medicina y se doctoró en 1969. Después de un postdoctorado en la Universidad Rockefeller volvió a Ginebra para ocupar su puesto actual.





1. FABRICA DE LA INSULINA: eso es el páncreas. En él las células beta especializadas se agrupan en pequeñas regiones llamadas islotes de Langerhans. Las dos microfotografías corresponden a secciones de tejido adyacente procedente de un mismo islote. Cada corte, aumentado aquí 1100 veces, contiene numerosas células beta seccionadas; sus núcleos son los lunares rojo oscuro. Uno de los cortes (*arriba*) se expuso a anticuerpos monoclonales que se unen a la proinsulina, un precursor de la insulina. Para distinguirlo, el anticuerpo se marcó con un colorante amarillo fluorescente. El brillo revela que la proinsulina se concentra alrededor del núcleo de las células beta, lo que sugiere que reside en el aparato de Golgi: un orgánulo que distribuye las proteínas y las porta hasta sus distintos destinos celulares. El otro corte (*abajo*) se expuso directamente a un anticuerpo fluorescente anti-insulina. La insulina parece gozar de una distribución mucho más amplia, lo cual indica que está asociada a gránulos secretores que llevan la hormona desde el aparato de Golgi hasta la membrana celular.



2. CELULA BETA cargada de insulina, aumentada 6500 veces. Las numerosas vesículas circulares que contienen manchas obscuras son los gránulos de secreción no recubiertos en los que se almacena la insulina, lista para ser liberada de la célula si aumentan los niveles de glucosa en sangre. Las regiones de la célula beta que no intervien en la síntesis de nuestra hormona no se aprecian suficientemente bien en esta micrografía.

beta, la insulina, se compone de dos cadenas aminoacídicas separadas, A y B, unidas por puentes disulfuro. En 1960, se descubrió el mecanismo de ensamblaje de esta proteína gracias a los trabajos pioneros de Donald F. Steiner y sus colaboradores, de la Universidad de Chicago. Incubaron células beta con aminoácidos que habían marcado con un isótopo radiactivo. Las células incorporaron los aminoácidos en las proteínas, que quedaban así al descubierto por su marcador radiactivo. De esta forma, mediante el proceso químico de cromatografía, se podía separar, analizar e identificar las proteínas marcadas. Así se comprobó que la insulina se sintetizaba realmente como fragmento de una proteína mayor: un precursor que Steiner y sus colaboradores denominaron proinsulina. Merced al trabajo de Steiner y de muchos otros que, como él, se han dedicado al estudio de la síntesis de proteínas destinadas a la secreción, podemos contar ya con el siguiente esquema general.

Para ser exactos, los ribosomas no sintetizan insulina ni proinsulina, sino una molécula precursora mayor, la preproinsulina; es ésta la proinsulina con una pequeña secuencia adicional de aminoácidos. Los ribosomas que ensamblan la preproinsulina se encuentran anclados en el exterior de una red compleja de sacos aplanados que se distribuyen por el citoplasma. Estos sacos o cisternas se van englobando unos en otros, de suerte que la red se convierte en una auténtica bolsa llena de circunvalaciones: el retículo endoplasmático. Los ribosomas contienen al retículo una apariencia granulosa y ello le ha valido el nombre de retículo endoplasmático rugoso, o RER.

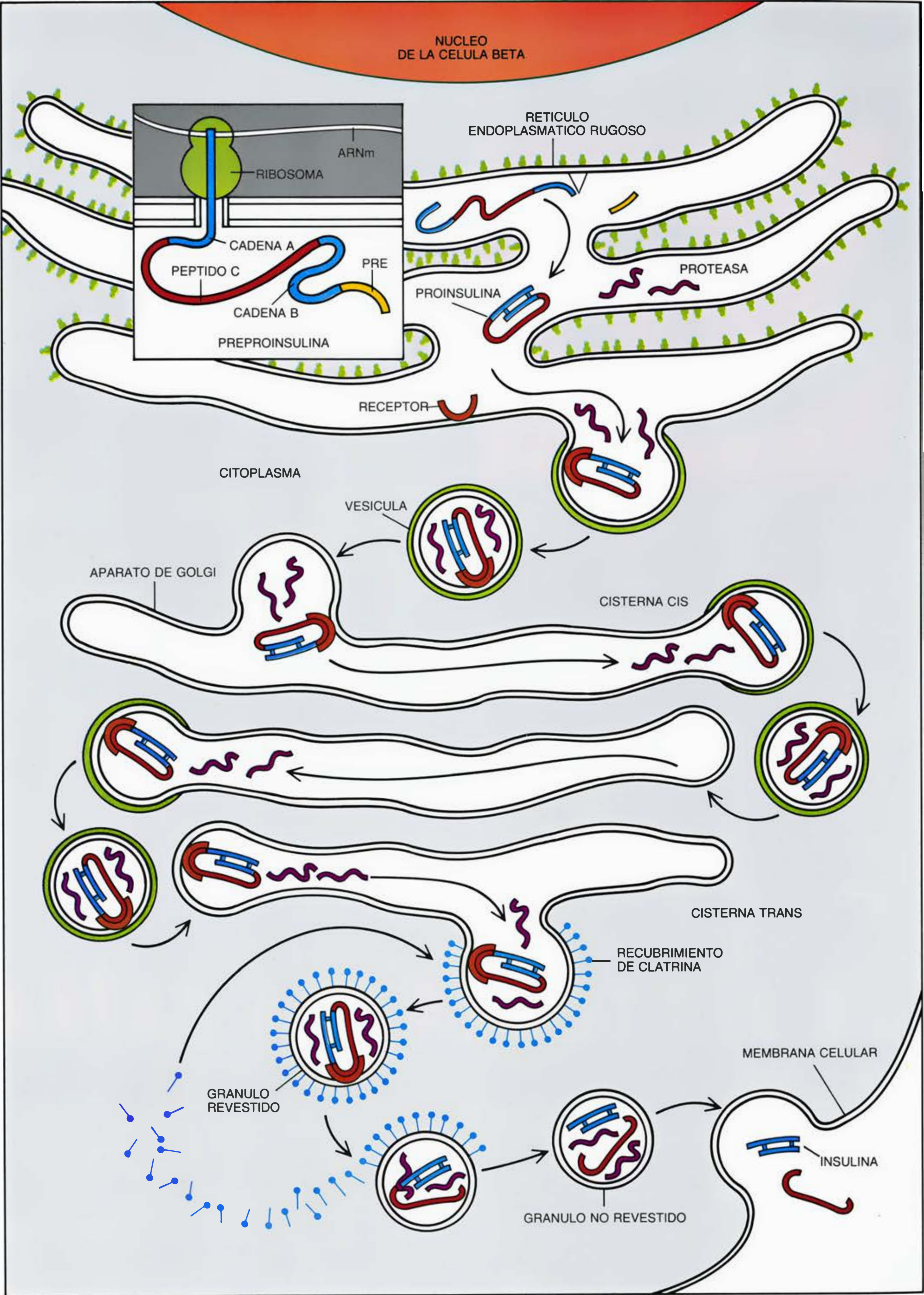
La presecuencia de la preproinsulina dirige la proteína, desde el ribosoma, a través de la membrana del RER. En cuanto ésta alcanza el lumen o porción interior del RER, la presecuencia es degradada por proteasas (enzimas que hidrolizan proteínas) que los ribosomas sintetizan para ese fin. La hidrólisis enzimática de la preproinsulina deja en el interior del RER la proinsulina, una molécula que agrupa las cadenas aminoacídicas de la insulina y un péptido de unión, o péptido C, que engarza el final de una cadena con el principio de la otra. A su vez, como se explicará más adelante, el péptido C se separa de la molécula original, formándose la insulina [*véase la figura 3*].

Autorradiografía

Para determinar la localización exacta de las proteínas en el interior de las células beta, tras su síntesis en el RER, se requiere combinar el marcaje radiactivo con la autorradiografía de alta resolución, de la que fueron pioneros en 1960 George E. Palade y Lucien G. Caro, del Instituto Rockefeller de Investigación Médica. Lo mismo que antes, se incuban los tejidos con aminoácidos marcados radiactivamente. A distintos tiempos, se corta las células en secciones finas. Cada corte se cubre con una emulsión fotográfica sensible, de forma que la posición de los isótopos pueda solaparse con los rasgos estructurales de la célula, revelados por el microscopio electrónico. Una vez más, se determina en cada etapa la composición proteica mediante análisis químico.

Nosotros hemos aplicado ampliamente esta técnica para seguir la ruta de síntesis de la insulina. La autorradiografía muestra que, cinco minutos después del marcaje, la mayoría de las

3. CADENA DE MONTAJE DE LA FABRICACION DE INSULINA. La cadena comienza en el núcleo de la célula beta, donde el gen que codifica la molécula precursora, la preproinsulina, se transcribe en ácido ribonucleico (ARN). El ARN mensajero es exportado al citoplasma; aquí da instrucciones a los ribosomas anclados en el retículo endoplasmático rugoso (RER) para que ensamblen aminoácidos y formen la preproinsulina. La presecuencia (*amarillo*) se corta probablemente cuando la preproinsulina entra en el RER, quedando la proinsulina; se compone esta última de la secuencia de aminoácidos que formará la insulina (*azul*) unida por el péptido C (*rojo*). La proinsulina, unida probablemente a los receptores (*marrón*), y las proteasas (*morado*) se transportan, en pequeñas vesículas, hasta el polo *cis* del aparato de Golgi. Se desplazan hasta el final de la primera cisterna o saco de Golgi; en este lugar, se forman, por evaginación, vesículas que van hasta la siguiente cisterna y se fusionan con ella. Estas vesículas poseen una membrana con un recubrimiento distintivo (*verde*). Cuando se alcanza el punto más alejado del Golgi, o *trans*, las vesículas recubiertas con clatrina (*filamentos azules*) dan lugar a los gránulos de secreción revestidos. En estos gránulos, las proteasas comienzan a separar el péptido C de la molécula de proinsulina para producir insulina. Este proceso va acompañado de la pérdida del revestimiento de clatrina; el resultado es la formación de los gránulos desnudos que contienen mayoritariamente insulina, que se libera a través de la membrana celular.


NUCLEO
DE LA CELULA BETA
RETICULO
ENDOPLASMATICO RUGOSO
ARNm
RIBOSOMA
CADENA A
PEPTIDO C
PRE
CADENA B
PREPROINSULINA
PROTEASA
PROINSULINA
RECEPTOR
CITOPLASMA
VESICULA
APARATO DE GOLGI
CISTERNA CIS
CISTERNA TRANS
RECUBRIMIENTO
DE CLATRINA
GRANULO
REVESTIDO
MEMBRANA CELULAR
INSULINA
GRANULO NO REVESTIDO

moléculas radiactivas se hallan en el RER. Por cromatografía se ve que la molécula predominante es la proinsulina; ello indica que la preproinsulina se escinde apenas se ha formado, dando lugar a la proinsulina.

Transcurridos quince minutos, la autorradiografía nos descubre que la mayoría de las moléculas marcadas se alojan ya en otra zona de la célula beta, en el complejo de Golgi. Más adelante nos detendremos en la función desempeñada por el aparato de Golgi. Ahora nos limitaremos a señalar que esta parte de la célula, igual que el RER, está compuesta de cisternas que no poseen ribosomas ni están conectadas unas con otras, sino que se encuentran apiladas, como un mazo de tortas.

Sigamos tras la pista de los isótopos radiactivos. Una hora después del marcaje, han abandonado el complejo de Golgi para establecerse en otros componentes de la célula beta: unas vesiculillas redondas y dispersas entre el complejo de Golgi y la membrana celular. El análisis de estos gránulos secretores muestra la presencia de la insulina ya madura. Es decir, se ha separado de la proinsulina el péptido de unión, quedando sólo las dos cadenas que forman la molécula de insulina.

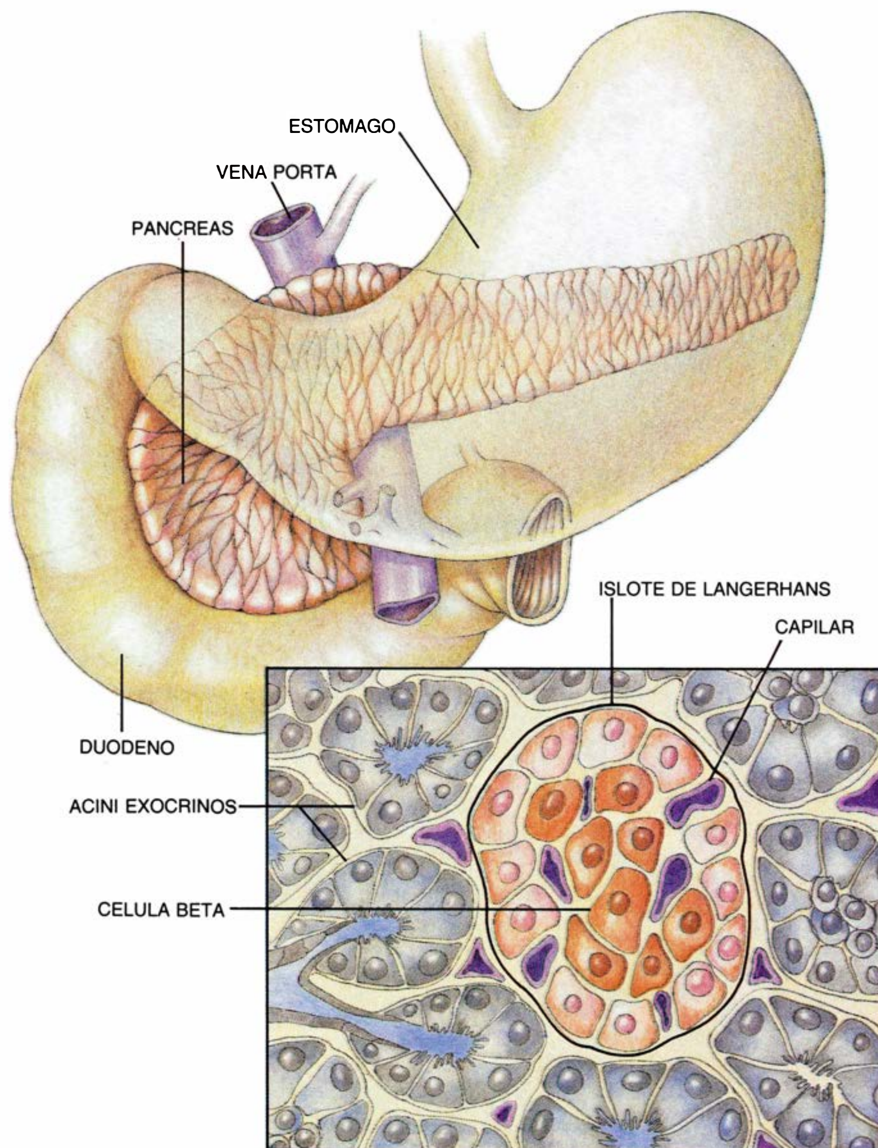
El complejo de Golgi

¿Dónde tiene lugar exactamente la transformación de la proinsulina en insulina? Son buenos candidatos el complejo de Golgi y las vesículas secretoras. La prudencia nos aconseja, pues, volver hacia atrás y observar los procesos con más detenimiento. Cuando se examina esta región en micrografías electrónicas adecuadamente aumentadas, se distinguen dos tipos de gránulos de secreción más o menos próximos al complejo de Golgi. Conforman el primer tipo los "gránulos de secreción recubiertos", así llamados en razón de la peculiar capa de filamentos que cubre su membrana externa. Estos filamentos están compuestos por una proteína, la clatrina, que se asocia a menudo con movimientos de membrana (y en particular con la gemación de segmentos de membrana, de la que hablaremos más adelante). Los gránulos de secreción recubiertos se encuentran llenos de una proteína algo densa, que se distribuye uniformemente por todo el gránulo. Se les ve muy cerca del aparato de Golgi y a veces parecen brotar de las dilatadas cisternas de éste.

El segundo tipo de gránulos, mucho más abundantes, se encuentran dispersos por todo el citoplasma de la célula beta. Su proteína de relleno es más densa que la de los gránulos recubiertos y queda separada de la membrana del gránulo por un halo más claro. A diferencia del primer tipo de gránulos, éstos carecen de la capa de clatrina; son, pues, "gránulos no recubiertos". El hecho de que los gránulos recubiertos se hallaran más cerca de las cisternas del Golgi y pudiera a veces observarse su gemación desde éstas, mientras que los no recubiertos se situaban más lejos de los sáculos de Golgi, indujo a suponer que los gránulos recubiertos eran precursores de los granos desnudos.

La sospecha ha recibido confirmación experimental. La autorradiografía muestra que el pico de proteínas marcadas radiactivamente que aparece en los gránulos recubiertos lo hace unos treinta minutos después en los granos sin recubrir. Además, por análisis químico se ha observado que cuando aparece el pico de las proteínas en los gránulos recubiertos, la mitad más o menos de la proinsulina se ha convertido ya en insulina. En otras palabras, la conversión de proinsulina en insulina se produce en los gránulos recubiertos.

Recientemente, en una serie de experimentos cruciales llevados a cabo con Ole Madsen, del Laboratorio Hagedorn de Investigación de Gentofte (Dinamarca), y Max Storch, del Hospital Clínico de Freiburg (Alemania Federal), hemos demostrado que los gránulos recubiertos constituían el lugar de conversión de la proinsulina en insulina. En nuestros experimentos



4. EL PANCREAS se aloja debajo del estómago. Se dedica principalmente a la producción de enzimas digestivas, que segrega al intestino por medio de un conducto; el proceso se denomina secreción exocrina. Dispersos por el órgano se encuentran los islotes de Langerhans (*en el recuadro*), que contienen las células beta productoras de insulina. Esta no se libera a través de un conducto, sino directamente a los capilares sanguíneos y, por tanto, a la circulación general; el proceso es, pues, de secreción endocrina. La sangre procedente de los capilares es recogida por la vena porta (*azul*) para su distribución a todo el organismo.

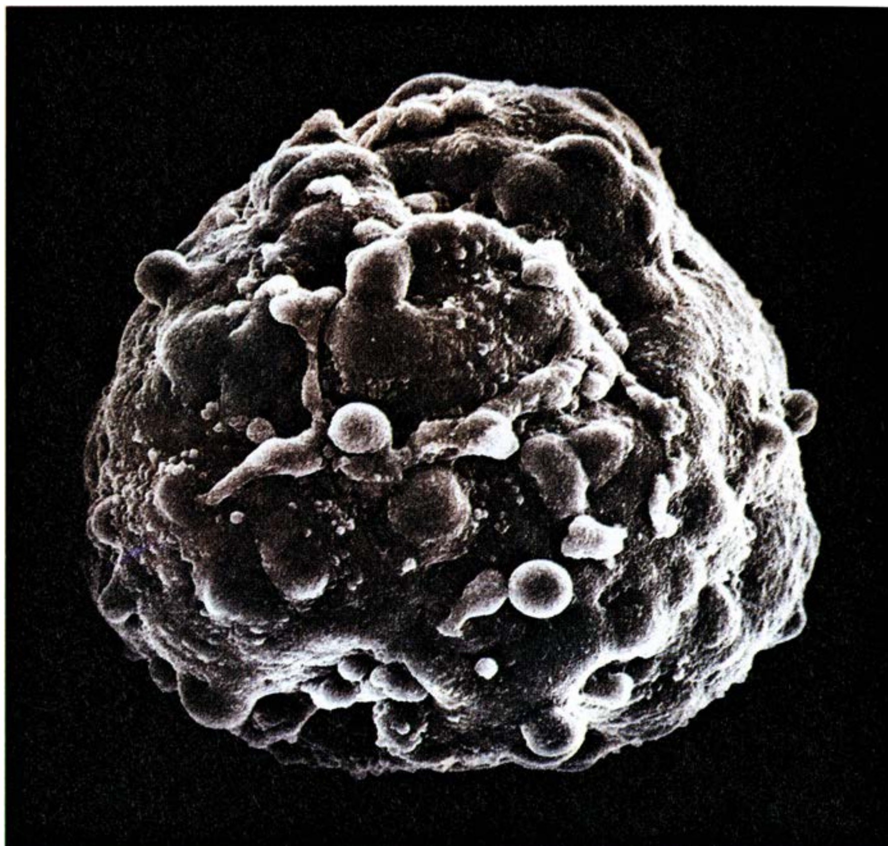
combinamos la gran resolución del microscopio electrónico con la precisión del marcaje radiactivo. En un anticuerpo específico de la proinsulina prendemos pequeñas partículas de oro que son opacas a los electrones y, por tanto, destacan en las micrografías electrónicas [*véase la figura 8*]. Tras seccionar las células beta y exponer los cortes a los anticuerpos marcados con oro, se observan dos compartimentos celulares ricos en proinsulina: los sáculos del aparato de Golgi y los gránulos recubiertos. Los gránulos desnudos aparecen con muy poca proinsulina.

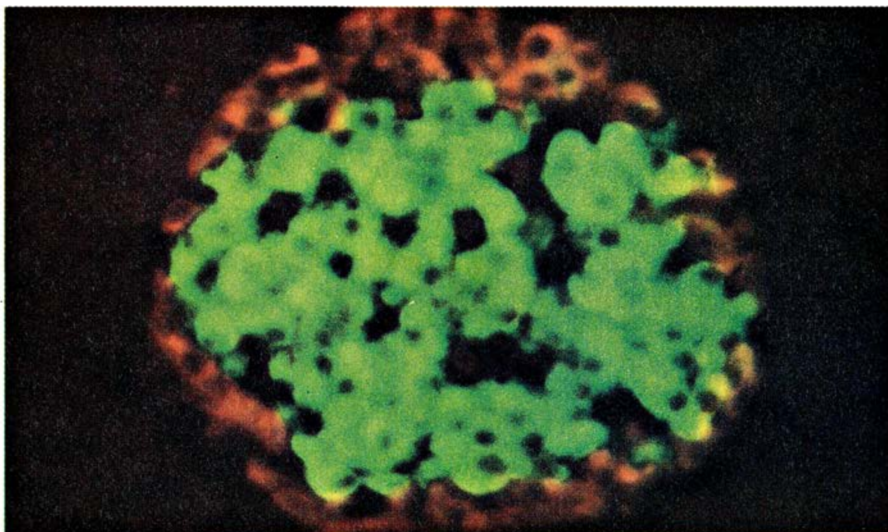
Hallazgo que ha corroborado recientemente un segundo experimento, muy similar al anterior aunque con una salvedad: el anticuerpo era específico de la insulina, no de la proinsulina. El ensayo revela que la insulina no aparece en los sáculos del Golgi, se detecta, en pequeñas cantidades, en los gránulos recubiertos y se muestra mucho más abundante en los no recubiertos. Por tanto, los gránulos recubiertos deben ser el lugar inicial de conversión de la proinsulina en insulina; para cuando éstos se transforman en gránulos sin recubrir el proceso de conversión ha terminado.

Aunque las cisternas del Golgi no contienen, de suyo, insulina, el paso del precursor a través de los sáculos parece constituir un paso crítico del proceso global, ya que el aparato de Golgi incorpora la proinsulina en los gránulos de secreción recubiertos, donde se lleva a cabo la conversión de ésta en insulina. La función del aparato de Golgi se comprende mejor cuando se considera el transporte de proteínas a través del mismo.

Microvesículas

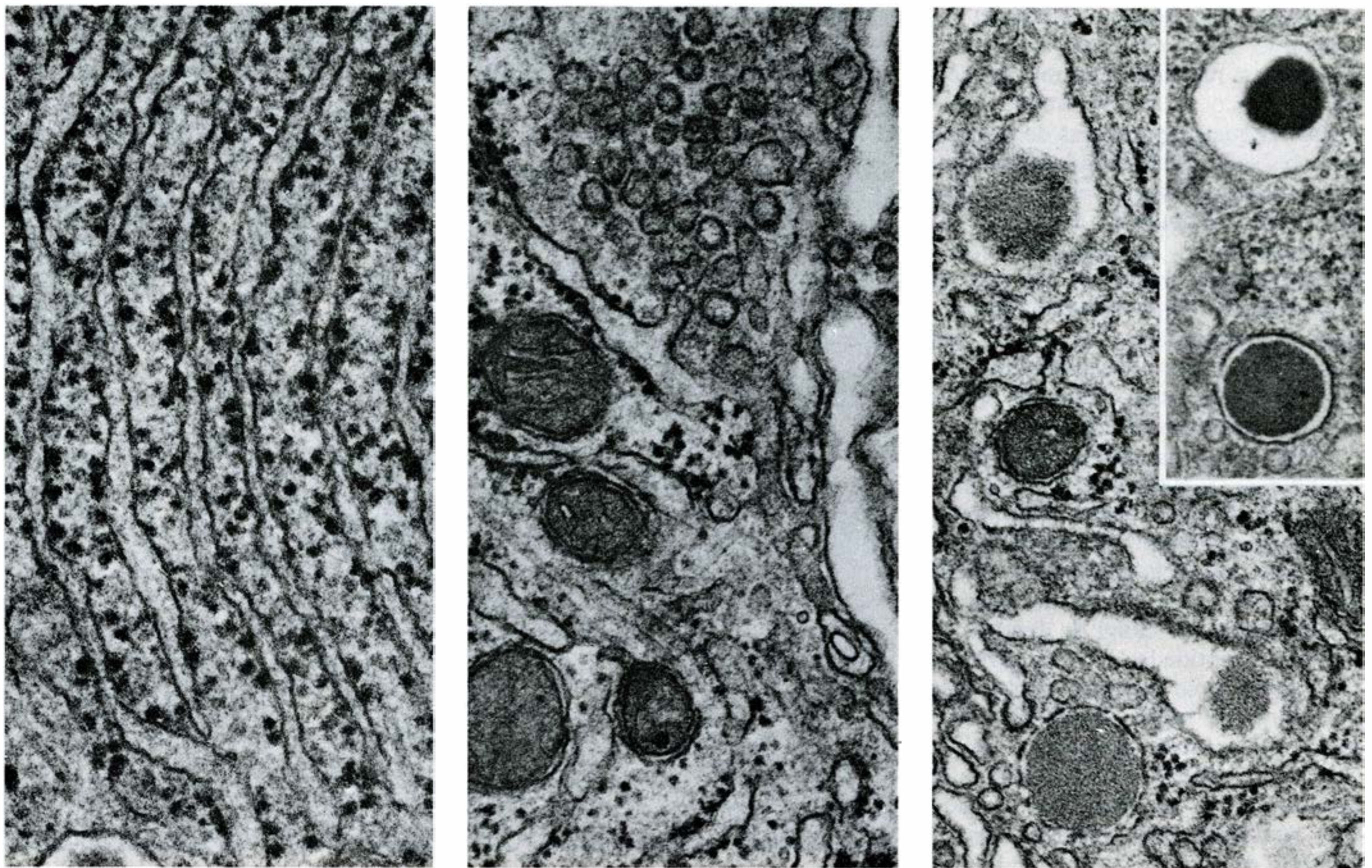
Existe un flujo uniforme de pequeñas vesículas, procedentes del retículo endoplasmático y portadoras de una gran diversidad de proteínas de síntesis reciente hacia los sáculos del aparato de Golgi. Cuando llegan a los sáculos, las vesículas se fusionan con la membrana de la cisterna que está más próxima al RER. (Este lado del sáculo de Golgi se denomina *cis*, partícula latina que significa "en el mismo lado que".) En la otra cara del sáculo (llamada *trans*, del latín "al otro lado de"), las cisternas comienzan a emitir unas yemas o extremidades dilatadas que llevan filamentos de clatrina y en las cuales llega a apreciarse su contenido denso en proteínas; estas evaginaciones dan lugar a los gránulos de secreción recubiertos.



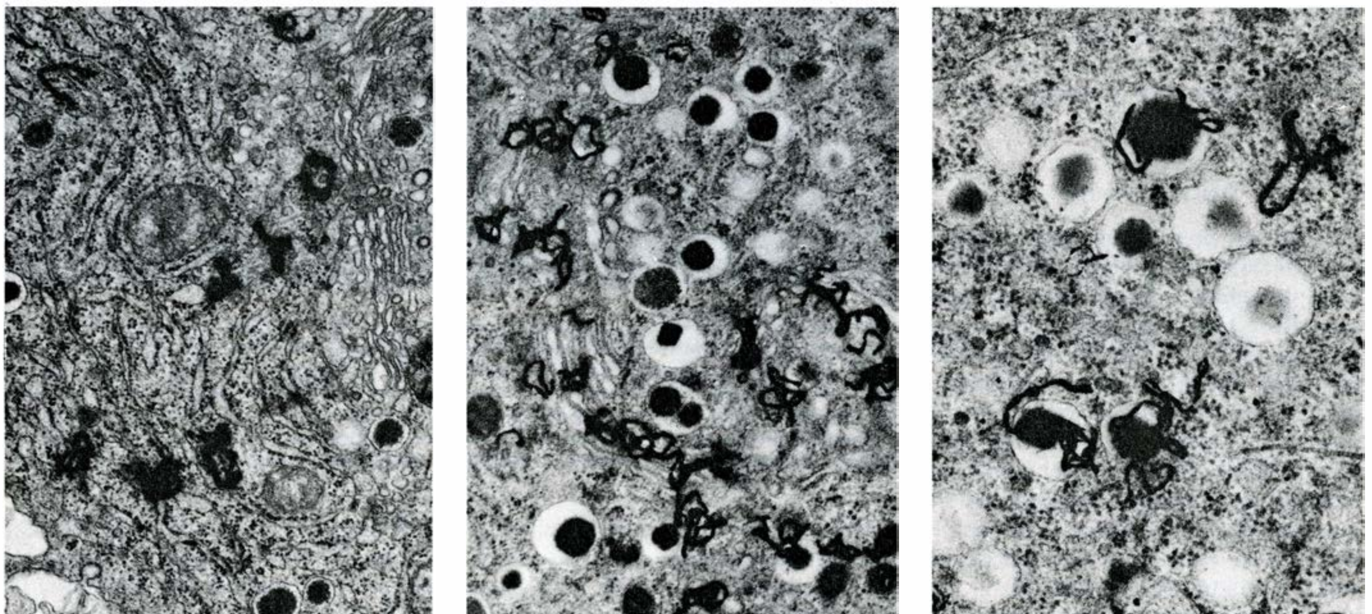


5. ISLOTE DE LANGERHANS, que aparece como un cuerpo ovoide irregular en una micrografía de barrido (*arriba*) aumentada 960 veces. Hay alrededor de un millón de islotes dispersos por el páncreas. Las células de los islotes producen diversas hormonas, incluidos el glucagón y la insulina. En la micrografía (*abajo, aumentada 525 veces*), los anticuerpos fluorescentes (*verde*) específicos contra la insulina muestran que las células beta que contienen esta hormona ocupan el centro del islote. Los anticuerpos (*rojo*) contra el glucagón muestran que las células productoras de éste se encuentran en la periferia de los islotes. Las células productoras de somatostatina y polipéptido pancreático se alojan también en la periferia.

El mecanismo del que se sirve la proinsulina, lo mismo que otras proteínas sintetizadas en el RER, para viajar por el interior de los sáculos del Golgi, del polo *cis* al *trans*, centra hoy la atención de múltiples investigaciones. Recientemente, en colaboración con James E. Rothman, de la Universidad de Princeton, hemos observado que la transferencia proteica de una cisterna del Golgi a la siguiente se realiza por medio de "microvesículas", similares a las que transportan las proteínas del RER al polo *cis* de los sáculos del Golgi. El modelo en vigor sobre el transporte por el interior del Golgi enseña que las microvesículas surgen por gemación del extremo de una cisterna, viajan a la siguiente y se fusionan con ella; este proceso se repite hasta que se



6. MICROGRAFIAS ELECTRONICAS obtenidas en la Universidad de Ginebra que muestran regiones sucesivas de la fábrica de insulina ampliadas 81.400 veces. El retículo endoplasmático rugoso, visible en el panel de la izquierda, consta de sacos alargados y recubiertos de ribosomas (*corpúsculos densos*). La transferencia de la proinsulina a los sacos del aparato de Golgi se realiza por medio de vesiculillas procedentes del RER, que se fusionan con las cisternas del aparato de Golgi (*panel central, arriba*). En el panel de la derecha, un gránulo recubierto (*cuerpo denso, abajo*) ha surgido por evaginación de una cisterna dilatada del polo *trans* del aparato de Golgi. En el recuadro superior de la micrografía derecha aparecen representados un gránulo recubierto y otro desnudo.



7. AUTORRADIOGRAFIA para localizar las proteínas marcadas radiactivamente en las micrografías electrónicas. Se suministra a las células beta un aminoácido marcado radiactivamente y ellas lo incorporan en la preproinsulina. Sobre delgadas secciones del tejido se coloca una emulsión fotográfica, formada por cristales de bromuro de plata en un gel, con el fin de registrar las posiciones de las moléculas marcadas a distintos tiempos. El revelado fotográfico de la emulsión realza unas hebras negras similares a fideos en el lugar donde la emulsión ha sido expuesta a la radiactividad. Tras una exposición de cinco minutos de las células a los aminoácidos marcados, la mayoría de las proteínas radiactivas sintetizadas se encuentran en el RER (*izquierda*). Diez minutos después aparecen en la región del aparato de Golgi (*centro*); transcurrida una hora del marcaje, la mayoría de los aminoácidos radiactivos se hallan en los gránulos de secreción (*derecha*). El análisis químico demuestra que la transformación de la proinsulina en insulina acontece entre el Golgi y los gránulos secretores.

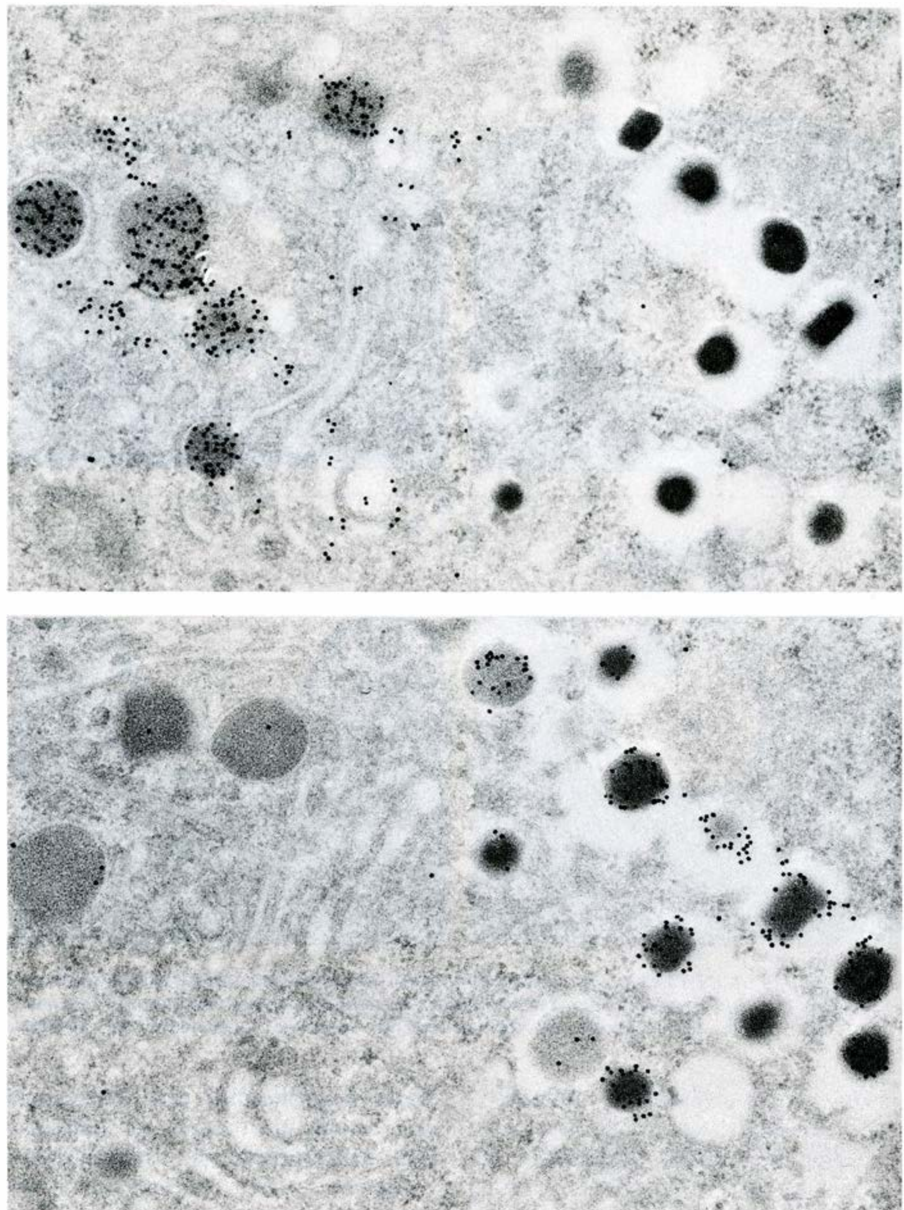
alcanza el polo *trans*. Al igual que los gránulos de secreción recubiertos, estas vesículas se hallan también revestidas por una membrana, pero no de clatrina; no conocemos todavía ni su función ni su composición.

Distribución de las proteínas

Como hemos mencionado, el complejo de Golgi acoge una amplia variedad de proteínas procedentes del RER; a cada una de ellas hay que llevarla hasta su destino en el seno de la célula. Para hacerse una idea de la complejidad de este proceso, conviene tener en cuenta que, además de la insulina, cuyo destino final es la sangre, hay otras proteínas que son enviadas a la membrana de la célula beta y otras a distintos orgánulos de ésta. Y lo que es aún más, algunas de las proteínas destinadas a la membrana celular parecen alcanzar su objetivo de manera continua, sin necesitar un estímulo específico. (Se las conoce por proteínas "no reguladas" o "constitutivas".) Otras proteínas, como la insulina, se denominan "reguladas" porque se segregan sólo cuando hay un estímulo adecuado –por ejemplo la glucosa– que alcanza a la célula beta. El aparato de Golgi es el responsable de que ambos tipos de proteínas sigan su ruta respectiva.

Para que este sistema funcione adecuadamente, el aparato de Golgi está equipado, así se cree, con receptores específicos de las proteínas reguladas. Aunque no se les ha observado directamente, pensamos que los receptores en cuestión se unen a la proinsulina ante la cara interna de la membrana del Golgi y transportan la hormona hasta las cisternas del polo *trans*. Almacenada allí la proinsulina, el extremo dilatado de la cisterna se estrangula hasta convertirse en un gránulo de secreción recubierto. Esta hipótesis se basa en una observación de microscopía electrónica, a saber, que la proinsulina se aloja en la cara interna de las cisternas del Golgi; en el gránulo de secreción, sin embargo, la proinsulina se distribuye uniformemente por el mismo, lo que podría indicar que la proinsulina se ha desenganchado de los receptores y, por tanto de la membrana, del gránulo.

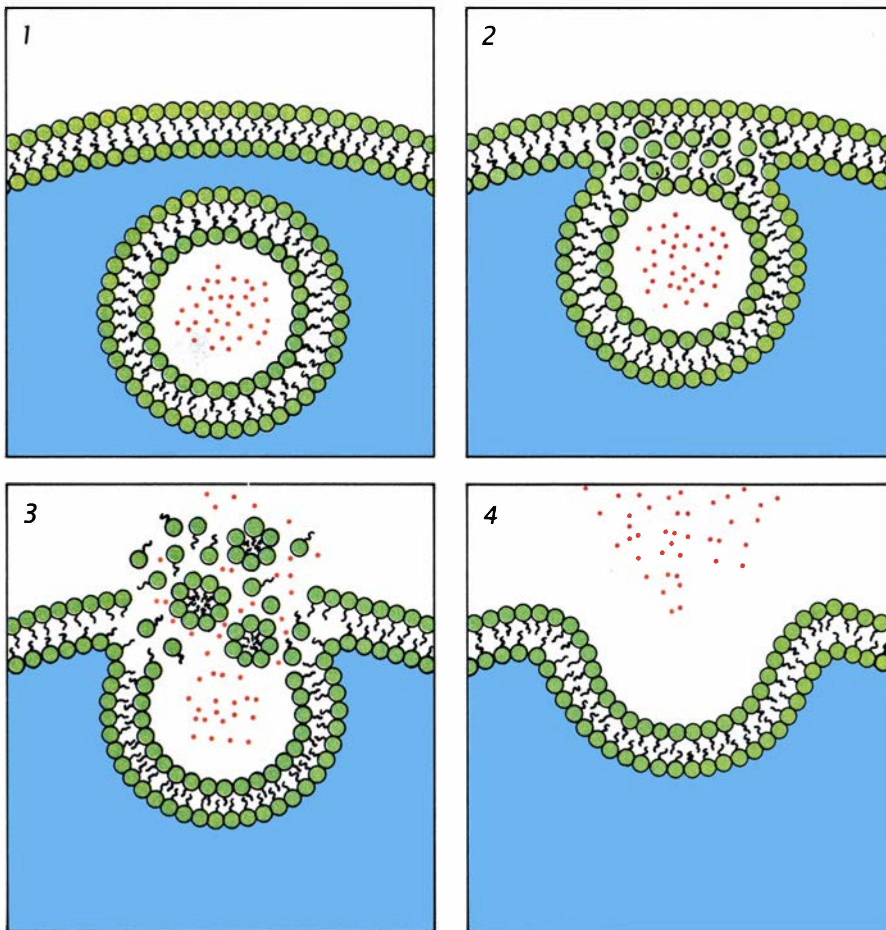
Hsiao-Ping H. Moore, Michael D. Walker y Regis B. Kelly, de la Universidad de California en San Francisco, y Frank Lee acaban de aportar nueva luz al problema de la distribución a través del Golgi. Cultivaron células endocrinas de la glándula hipofisaria. En estas células, que segregan la hormona adrenocorticotropa (ACTH), introdujeron una secuencia de ADN que codifica o determina proinsulina. Se trucaron, pues, las células de la hipófisis para que sintetizasen proinsulina junto con la ACTH. El grupo de Moore descubrió que la ACTH se segrega y regula igual que la proinsulina. Más tarde, en colaboración con Moore, hemos descubierto ACTH e insulina en los mismos gránulos de secreción de las células de la hipófisis. En otras palabras, el aparato de Golgi no distingue entre proinsulina y ACTH; las porta al mismo destino. Esto indica que, además de las células beta, hay otras células equipadas también con receptores que agrupan las proteínas en los gránulos secretores; lo que sugiere con bastante verosimilitud que un receptor puede reconocer varias proteínas reguladoras.



8. LUGAR EXACTO donde la proinsulina es convertida en insulina. Se identificó en estas micrografías electrónicas por el marcaje de dos secciones consecutivas de las células beta con anticuerpos anti-proinsulina (*arriba*) y anti-insulina (*abajo*) marcados con oro (*puntitos negros*). Se encontró unicamente proinsulina en el aparato de Golgi y en los gránulos de secreción recubiertos; en éstos, la insulina aparece en pequeñas cantidades, mientras que es muy abundante en los gránulos sin recubrir. Podemos afirmar, por consiguiente, que la conversión de proinsulina en insulina comienza en los gránulos recubiertos y continúa a medida que éstos se van transformando en no recubiertos. La ampliación de la imagen es de 39.400 diámetros.

Reguladas y no reguladas

El problema principal que permanece todavía por esclarecer es el relativo a la identificación del receptor que hay en los sacos de Golgi y descubrir el punto exacto donde se le une la proteína. En colaboración con Sharon K. Powell, Charles Craik y Moore, hemos dado ya un primer paso en esta dirección. Modificando el ADN que codifica la proinsulina e inyectándolo en la célula beta, conseguimos que la célula



9. SECRECION DE INSULINA. El proceso requiere que la membrana de los gránulos de secreción desnudos se fusione con la membrana externa de la célula beta. La insulina es así secretada a través de la membrana celular sin que ésta se rompa. Este tipo de secreción se conoce con el nombre de exocitosis.

produjera una proinsulina "mutante". Así descubrimos que la deleción de la secuencia que codifica el péptido C no afecta a la correcta distribución de la proinsulina en los gránulos secretores. Actualmente estamos investigando la deleción de otros segmentos de la molécula de proinsulina para determinar exactamente qué dominio (o dominios) controlan el proceso de su distribución.

Alguien podría preguntarse si las proteínas constitutivas y no reguladas, a que aludíamos antes siguen la misma ruta que la proinsulina. En colaboración con el grupo de Moore hemos observado directamente la vía tomada por una proteína, la hemaglutinina, que se exporta hacia la superficie celular sin necesidad de un estímulo exterior. La hemaglutinina se sintetiza por las células beta cuando es infectada por el virus de la gripe. La hemaglutinina se transporta entonces hasta la membrana celular, donde se incorpora a nuevos virus que infectarán luego otras células.

La localización simultánea de proinsulina y hemaglutinina nos ha permitido hallar el punto exacto donde divergen las rutas de las proteínas reguladas y las rutas de las no reguladas. Ambas proteínas coexistían en la mayoría de las cisternas del aparato de Golgi; la hemaglutinina no se encontraba, sin embargo, en la parte dilatada de las cisternas del polo *trans*, lugar de concentración de la proinsulina. Después, la hemaglutinina no apareció en los gránulos "recubiertos", sino en unas vesículas transparentes, carentes de rugosidades, que se movían hacia la membrana celular. El experimento descubría, pues, que las cisternas del polo *trans* del aparato de Golgi constituían el lugar donde la proinsulina se separaba de la hemaglutinina.



10. EXOCITOSIS vista en una micrografía electrónica. Un gránulo de secreción, aumentado aquí 71.000 veces, está a punto de fusionarse con la membrana de la célula beta y liberar insulina al espacio extracelular (*izquierda*). Otro gránulo se ha abierto ya y comienza a secretarse la insulina (*derecha*). Cada gránulo de secreción libera unas 800.000 moléculas. La fusión continua de gránulos con la membrana aumentaría la superficie celular, de no mediar el reciclaje del material; este proceso tiene lugar cuando trozos de la membrana se invaginan formando vesículas que se acarrean hacia el interior. Se trata del proceso de endocitosis.

Síntesis de insulina

Volvamos ahora a la síntesis de insulina. Según expusimos más arriba, la producción final de insulina a partir de la proinsulina en los gránulos recubiertos requería la separación del péptido de unión. En consecuencia, por cada molécula de insulina que se sintetiza, se genera otra molécula de pétido C, transportado con aquélla en los gránulos de secreción. Parece también razonable que las proteasas, sintetizadas por los ribosomas del RER, sigan la misma ruta que la proinsulina, desde el RER hasta los gránulos de secreción recubiertos, a través de los sáculos de Golgi. Si las proteasas están siempre presentes, ¿por qué se divide la proinsulina para rendir insulina sólo cuando alcanza aquélla los gránulos revestidos? En otras palabras, ¿por qué se activan estas enzimas en fase tan tardía?

En colaboración con Richard G.W. Anderson, de la Universidad de Texas en Dallas, acabamos de hallar una posible respuesta a esa cuestión. Nuestros experimentos revelaron la existencia de un gradiente de acidificación progresiva entre los gránulos recubiertos y los desnudos, gradiente que se halla en relación inversa con la cantidad de insulina presente en dichos gránulos. Sugiere que la acidificación del interior de los gránulos recubiertos es un factor

importante en la activación de las proteasas. De hecho una de las enzimas implicada en la ruptura de la proinsulina es más activa a *p*H ácido cuando se estudia en el tubo de ensayo. Además, cierto número de moléculas alcalinas, como el cloruro de amonio, que se acumulan en los gránulos y neutralizan el *p*H ácido, inhiben la ruptura de la proinsulina.

Hasta aquí hemos examinado la producción de insulina a partir de preproinsulina y proinsulina en su curso por el RER, el aparato de Golgi y los gránulos de secreción recubiertos. Volvamos a la secreción de la insulina recien producida.



11. SE DIRIA QUE SON ROSETONES de una catedral medieval los poros que existen en las finas paredes de las células endoteliales de los capilares sanguíneos. Para entrar en la circulación, tras abandonar la célula beta, la insulina puede cruzar los cortes en forma de cuña de estos diafragmas (aquí aumentados 270.000 veces en una micrografía electrónica), compuestos de finos radios fibrilares que parten de una malla central.

Secreción de insulina

Junto con el péptido C y una pequeña cantidad de proinsulina sin romper, la insulina se almacena en los gránulos desnudos y maduros, dispuesta ya para su secreción en respuesta a un estímulo apropiado: por ejemplo, aumento de la concentración sanguínea de glucosa. Ahora bien, no toda la hormona que se sintetiza por la célula beta terminará por segregarse. En la ruta hacia la membrana celular donde se produce la secreción, algunos gránulos se fusionarán con lisosomas, que podrían considerarse los "basureros" celulares. Esto conlleva la total degradación de la insulina en estos gránulos. No hay una explicación racional para este dispendio, en el que una parte de la insulina se degrada en la misma célula que lo sintetiza. Se ignora si la degradación lisosómica sirve para regular la cantidad de hormona disponible para la secreción o si se trata de un sistema para deshacerse de gránulos defectuosos.

Para que la insulina se libere a la sangre debe atravesar dos barreras impermeables, la membrana del gránulo y la membrana de la célula beta. La naturaleza ha dado una solución sencilla y elegante a ese problema. Con el microscopio electrónico se puede observar que, conforme el gránulo secretor arriba al límite celular, la membrana del gránulo se fusiona con la membrana celular. En este proceso, denominado exocitosis, la membrana del gránulo se convierte en parte de la membrana celular y el contenido del mismo se libera a la circulación. La fusión de las membranas permite la secreción de la insulina manteniendo la continuidad de la membrana celular durante todo el tiempo. Las células que segregan proteínas lo realizan mediante exocitosis.

El lector se habrá dado cuenta de que la ininterrumpida fusión de las membranas de los gránulos con la membrana celular produce un aumento de la superficie de esta última, a menos que otro mecanismo lo contrarreste. De hecho, el propio proceso de la exocitosis activa el mecanismo inverso: la endocitosis. En virtud de la misma, fragmentos de la membrana celular se invaginan formando vesículas endocíticas, que se distribuyen por la célula para su reciclaje o degradación.

Queda una cuestión final por resolver: una vez secretada al espacio extracelular la insulina, ¿cómo llega al torrente circulatorio para su distribución entre las células dianas repartidas por todo el organismo? Las células beta están rodeadas en los islotes de Langerhans por múltiples capilares. Hasta alcanzar la sangre, la insulina debe atravesar las paredes o el endotelio capilar. En las glándulas endocrinas, asi el páncreas, las células endoteliales están perforadas de numerosos poros circulares o fenestraciones. Cada poro se halla cubierto por un fino diafragma.

En colaboración con Elaine Bearer de nuestro grupo, hemos perfeccionado un técnica de criofractura seguida de microscopía electrónica para observar los poros endoteliales con gran detalle. Este procedimiento nos ofrece una visión frontal plena de la superficie de la membrana celular. Descubrimos que cada poro semeja un rosetón catedralicio: el diafragma consta de una serie de finas fibrillas que irradian de una red central hasta crear unos canales en forma de cuña. Uno se siente tentado a asociar el rosetón con un regulador dinámico del flujo hormonal a través de las paredes capilares.

Hemos descrito el curso intracelular de la insulina desde su lugar de síntesis, el RER, hasta el punto de su secreción, la membrana de la célula beta. Se han puesto de manifiesto a lo largo de todo el trayecto las funciones realizadas por el aparato de Golgi y los gránulos secretores recubiertos de clatrina en la elaboración de la proinsulina. Muchas cuestiones esperan todavía respuesta, pero la información acumulada en los últimos años sobre el plan y línea de montaje de la "fabrica" de insulina ha abierto el camino a un conocimiento molecular más profundo de la secreción y regulación hormonal.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A PORTRAIT OF THE PANCREATIC B-CELL. L. Orci en *Diabetologia*, vol. 10, n.º 3, págs. 163-187; junio de 1974.

ULTRASTRUCTURAL ASPECTS OF EXOCYTOTIC MEMBRANE FUSION. Lelio Orci y Alain Perrelet en *Membrane Fusion*, dirigido por George Poste y Garth L. Nicolson. Elsvier North-Holland Publishing Co., 1978.

BANTING LECTURE 1981: MACRO- AND MICRO-DOMAINS IN THE ENDOCRINE PANCREAS. L. Orci en *Diabetes*, vol. 31, n.º 6, págs. 538-565; junio de 1982.

(PRO)INSULIN ASSOCIATES WITH GOLGI MEMBRANES OF PANCREATIC B CELLS. L. Orci, M. Ravazolla y A. Perrelet en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 81, n.º 21, págs. 6743-6746; noviembre de 1984.

DIRECT IDENTIFICATION OF PROHORMONE CONVERSION SITE IN INSULIN-SECRETING CELLS. Lelio Orci, Mariella Ravazolla, Mylène Amherdt, Ole Madsen, Jean-Dominique Vassalli y Alain Perrelet en *Cell*, vol. 42, n.º 2, págs. 671-681; septiembre de 1985.

A NEW TYPE OF COATED VESICULAR CARRIER THAT APPEARS NOT TO CONTAIN CLATHRIN: ITS POSSIBLE ROLE IN PROTEIN TRANSPORT WITHIN THE GOLGI STACK. Lelio Orci, Benjamin S. Glick y James E. Rothman en *Cell*, vol. 46, n.º 2, págs. 171-184; 18 julio de 1986.

El cometa Halley en primer plano

El despliegue de vehículos espaciales que pasaron cerca del cometa hace dos años proporcionó imágenes espectaculares y datos que continúan suministrando una información muy valiosa sobre la naturaleza de nuestro fiel visitante

Hans Balsiger, Hugo Fechtig y Johannes Geiss

El mes de marzo de 1986 se recordará por haber coincidido con una de las citas espaciales más espectaculares de la historia de la ciencia planetaria. Durante ese mes, una flota de sondas espaciales (dos japonesas, dos soviéticas y una europea) convergieron sobre el cometa Halley. Su objetivo era ambicioso: analizar los gases y el polvo en la inmediata vecindad de un cometa y fotografiar su núcleo, que es un cuerpo sólido, pequeño y ocultado en el interior de la cabeza de ese cuerpo celeste.

El Halley supera en fama e importancia histórica a los demás cometas. También es uno de los mejor adaptados para tales encuentros. A diferencia de los cometas que aparecen por vez primera, el Halley posee una órbita bien conocida, que nos faculta para enviar sondas cerca del núcleo capaces de obtener buenos datos. Además, la fuerte emisión de gas y polvo por el cometa sugiere que éste retiene gran parte de sus componentes helados y polvorientos originales. Dicho de otra manera, el cometa está constituido, probablemente, por materia primitiva y refleja, por ende, las condiciones que prevalecían cuando nació el Sistema Solar. Los cometas que tienen períodos medios más cortos que el de Halley –justo por debajo de los 77 años– se hallan sometidos con mayor frecuencia a erosión por la radiación solar al pasar cerca del Sol. Es, por tanto, menos probable que ofrezcan tal ventana para inspeccionar el pasado remoto.

La empresa fue un éxito completo. Mientras las sondas japonesas *Sakigake* y *Suisei* tomaban datos en la región del “frente de choque”, delante del núcleo, las sondas soviéticas *Vega-1* y *Vega-2* penetraban hasta una distancia de 9000 kilómetros del núcleo y la sonda europea *Giotto* lograba acercársele hasta 600 kilómetros. El gran esfuerzo e inversión financiera en estos proyectos dio su fruto: los investigadores, de los cuatro puntos cardinales, realizaron mediciones *in situ* de los procesos físicos y químicos que explican los espectaculares fenómenos que acompañan a un cometa en su viaje a través de la región interior del Sistema Solar. A lo largo del último bienio, la comunidad científica ha compilado y analizado el enorme volumen de datos adquirido.

Nuestra exposición se apoyará, sobre todo, en los resultados obtenidos por la sonda *Giotto*. Se trata de los resultados que mejor conocemos, por un lado, y, por otro, este vehículo espacial fue el que se acercó más al núcleo del Halley. Los datos aportados por las otras sondas espaciales, complementarios a los del *Giotto*, revisten parejo interés para obtener un cuadro completo de los fenómenos cometarios. Incluiremos en la exposición, pues, los descubrimientos de tales sondas siempre que se necesiten.

Para el éxito de la misión *Giotto* era obligada una trayectoria que acercase la sonda al núcleo tanto cuanto fuera posible, garantizando, por otro lado, que ni la propia sonda ni su estabilidad se viesen desfavorablemente afectadas por el gas o el polvo. Los riesgos calculados que corrieron los planificadores de la misión *Giotto* demostraron haber valido la pena. Precisamente durante los minutos antes del punto de máxima proximidad se realizaron algunas de las medidas cruciales. A esa vecindad del núcleo, las moléculas de gas y polvo habían conservado, en gran proporción, su forma original, inmutada desde la formación del cometa.

En cierto sentido, por tanto, el vuelo del *Giotto* representaba un recorrido hacia atrás en el tiempo, hasta la época en que nacieron los cometas. ¿Cómo y cuándo se formaron? De acuerdo con la teoría más aceptada, el nacimiento del Sistema Solar, cometas incluidos, arranca de hace unos 4600 millones de años; tenía el universo unos dos tercios de su edad actual. La materia interestelar –probablemente en forma de una oscura nube molecular– alcanzó una densidad suficiente para iniciar el colapso gravitatorio. El momento cinético se conservó durante el colapso, y se formó así un disco giratorio de materia. El Sol y los planetas se crearon gradualmente mediante un proceso de acumulación.

El astrónomo holandés Jan Oort desarrolló en 1950 un modelo sobre el origen de los cometas que ha gozado de amplia aceptación. Las órbitas de los cometas de períodos largos y las cantidades de gas que emiten cuando están cerca del Sol condujeron a Oort a postular que esos cuerpos, que son los menores del Sistema Solar, se formaron originariamente en gran número en la región de los planetas exteriores, allende la órbita de Júpiter. Muchos come-

HANS BALSIGER, HUGO FECHTIG y JOHANNES GEISS trabajaron juntos en el proyecto, ejecución y análisis de los datos de la misión *Giotto*. Balsiger, profesor de física extraterrestre en la Universidad de Berna, es investigador principal del equipo del espectrómetro de masas iónicas (IMS). Ha trabajado también en la Universidad Rice y en el laboratorio de investigación de la Lockheed en Palo Alto, California. Fechtig, director del Instituto Max Planck de Física Nuclear en Heidelberg y profesor emérito de su universidad, es miembro del equipo del analizador de impactos de partículas (PIA). Ha trabajado también en la Universidad de California en San Diego, en el laboratorio de las Fuerzas Aéreas en Bedford y en el Smithsoniano de Harvard. Geiss, que es miembro del equipo IMS, dirige el Instituto de Física de Berna, donde da clases. Se ha relacionado con distintas instituciones aeroespaciales europeas y norteamericanas.

tas se escaparon después al espacio interestelar por causa de las perturbaciones introducidas en sus órbitas por parte de los planetas exteriores. Varios, sin embargo, se concentraron en una nube situada entre 0,5 y dos años-luz del Sol, al borde de la región dominada por la atracción gravitatoria del Sol.

La nube cometaria de Oort, así se la conoce, ha ido sufriendo perturbaciones, durante miles de millones de años, a instancias de las fuerzas gravitatorias de estrellas errantes, que expulsaron cometas hacia el espacio interestelar o los inyectaron hacia órbitas relativamente próximas al Sol. La radiación y el viento solar (chorro de partículas eléctricamente cargadas procedentes del Sol) provocan que esos cometas desarrollen una cabellera –nube esférica de gas y polvo– y una cola. Las partículas de polvo de la cabellera y de la cola dispersan la luz, mientras que las moléculas de gas resultan excitadas por



1. COMETA HALLEY, fotografiado el 19 de marzo de 1986 desde la isla de la Reunión. Presenta su máximo brillo en la cabellera, la nube de gas y polvo que rodea el núcleo. Detrás de la cabellera, se ven una cola iónica recta y azulada y una cola de polvo curva y difusa. La iónica se debe a la interacción entre el gas cometario y el viento solar (chorro de partículas cargadas que sale del Sol); la de polvo resulta de la presión de la radiación solar sobre las partículas de polvo.

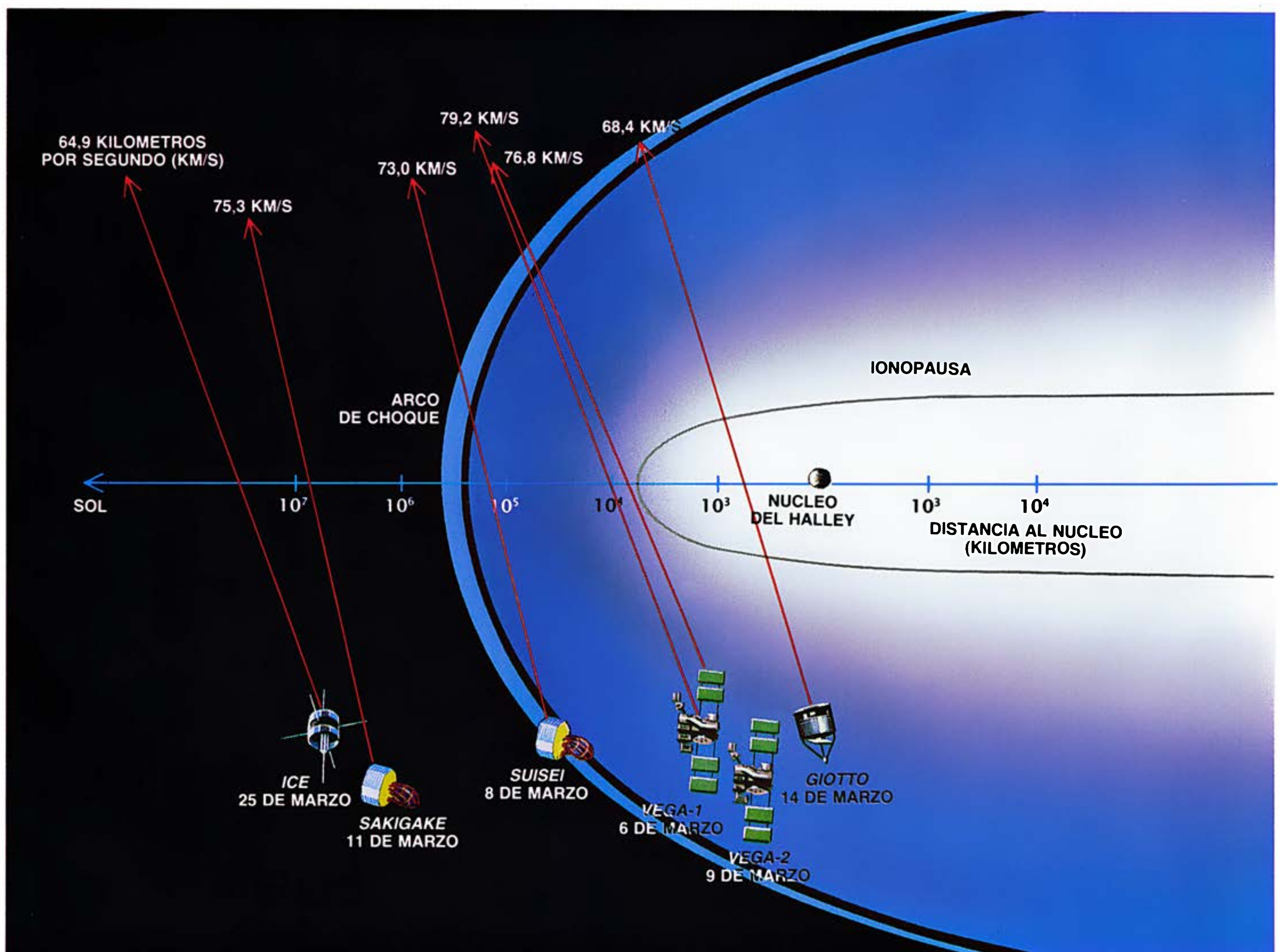
la radiación solar, que las hace emitir luminiscencia. El cometa se torna así visible.

La fuente del gas en la cabellera y la cola reside, probablemente, en la materia congelada y formada por substancias volátiles que el cometa ha recogido y mantenido a lo largo de miles de millones de años. Cuando un cometa pasa ante el Sol, las substancias congeladas del lado expuesto a sus rayos se subliman y liberan una mezcla gaseosa que se expande por el espacio interplanetario, contribuyendo a la cabellera y la cola. Después y gradualmente, la radiación ultravioleta disocia las moléculas de esa mezcla y las ioniza (despojándolas de un electrón externo). El gas de partículas eléctricamente cargadas resultante forma un plasma.

De aquí que la cabellera sea una mezcla de gases neutros e ionizados. La cabellera interior, próxima al núcleo, consta, sobre todo, de moléculas y átomos neutros. Más lejos del núcleo, la cabellera está progresivamente dominada por los iones. Cada clase de molécula o átomo requiere una cantidad precisa de tiempo para convertirse en ion, y cada uno se separa del cometa a una velocidad específica. En virtud de ello, cada especie alcanza una distancia característica antes de ionizarse. Por ejemplo, el hidrógeno atómico, que se produce cuando se disocian moléculas de agua, viaja a velocidad relativamente alta y, en consecuencia, retiene su forma eléctricamente neutra hasta distancias de más de diez millones de kilómetros del núcleo. En cuanto átomos y moléculas neutros se convierten en iones y electrones, caen bajo la influencia de los campos eléctrico y magnético transportados por el viento solar.

El astrofísico alemán Ludwig Biermann en 1951, el físico sueco Hannes Alfvén en 1957 y otros muchos después dieron interpretaciones esencialmente correctas de la interacción entre el plasma del viento solar y el plasma del cometa. Sus predicciones han recibido ahora confirmación *in situ* con las observaciones realizadas por las cinco sondas del Halley y por la sonda norteamericana *International Cometary Explorer (ICE)* que, en otoño de 1985, atravesó la cola del cometa Giacobini-Zinner [*véase* "Estructura de la cola de los cometas", por John C. Brandt y Malcolm B. Niedner, Jr.; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1986].

La precisión de los datos recogidos por esas sondas en la inmediata vecindad de los cometas ha permitido sustituir ahora las descripciones generales por explicaciones cuantitativas. Para estudiar la interacción entre el plasma del cometa y el viento solar –interacción similar a las que desempeñan importantes papeles en la evolución de las atmósferas de los planetas y sus satéli-



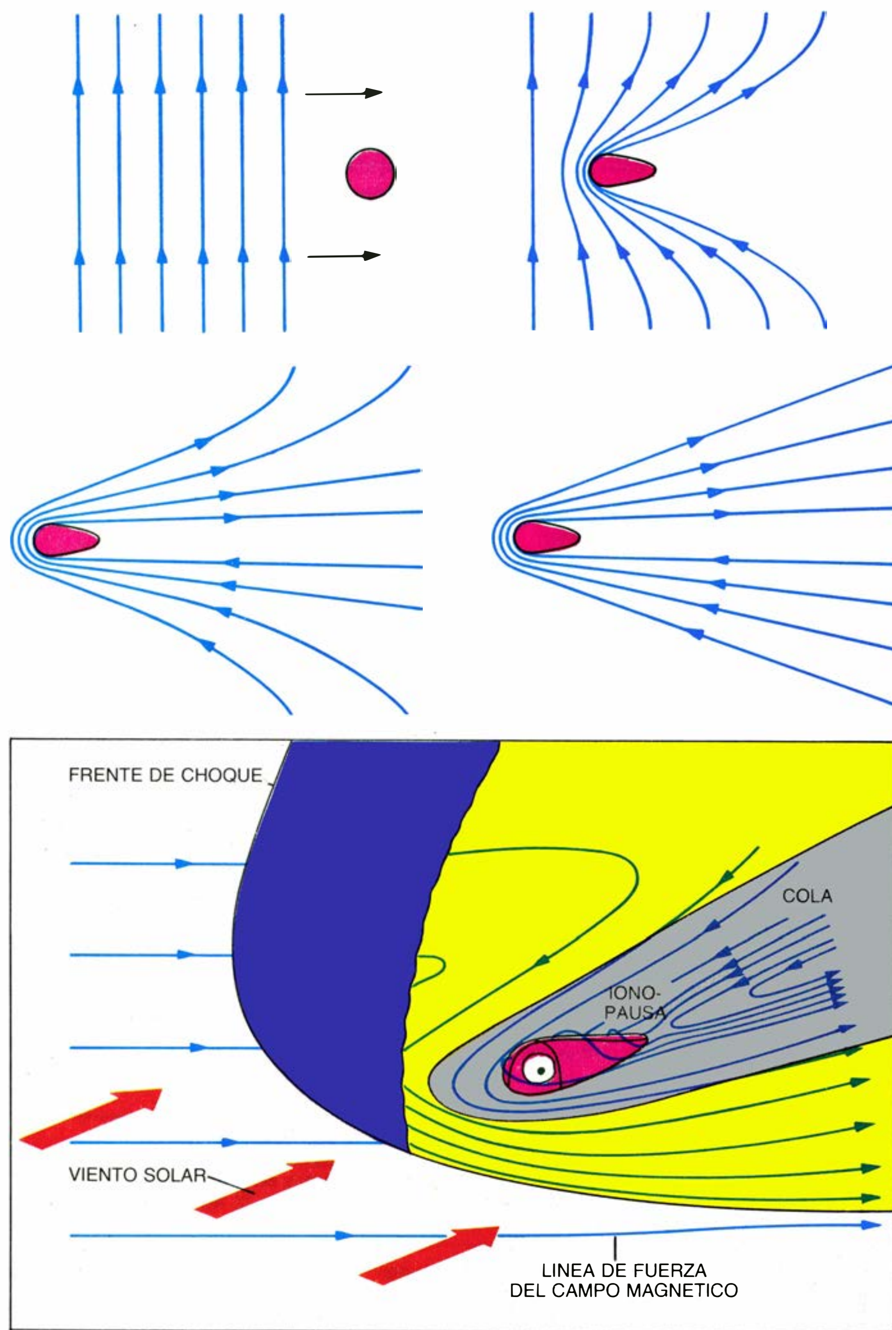
2. SEIS SONDAS ESPACIALES pasaron por la proximidad del cometa Halley en marzo de 1986. Cuatro de ellas –las soviéticas *Vega-1* y *Vega-2*, la japonesa *Suisei* y la europea *Giotto*– se acercaron al lado iluminado del núcleo, hasta una distancia de 600 a 150.000 kilómetros. Se tomaron las primeras fotografías de un núcleo cometario, se investigaron el gas y el polvo que salen en chorro del cometa y se estudiaron las interacciones entre el cometa y el viento solar. Además, las sondas *Sakigake* (japonesa) e *ICE* (norteamericana) recogieron datos relativas al viento solar, corriente arriba del cometa Halley. La sonda *Giotto*, que estaba equipada con un protector del polvo, fue la única que penetró en la ionopausa, que limita la región de gas cometario puro que rodea al núcleo.

tes– el *Giotto* transportaba distintos instrumentos [*véase la figura 4*]. Los instrumentos designados por JPA, RPA y EPA midieron las energías y direcciones de movimiento de las partículas, mientras que otros (IMS y NMS) distinguían entre las diversas clases de partículas. Había también a bordo un magnetómetro (MAG) que medía las perturbaciones del campo magnético interplanetario causadas por el cometa. Además, el magnetómetro registraba las ondas electromagnéticas producidas por la colisión del plasma solar con el plasma del cometa.

A una distancia de ocho millones de kilómetros del núcleo cometario, el IMS comenzó a registrar una población de protones distintos de los existentes en el viento solar. Las velocidades de los protones de esa población mostraban que las partículas eran, en realidad, átomos de hidrógeno de la cabellera del cometa recién ionizados. El campo magnético del viento solar se lleva tales protones, alejándolos del Sol en trayectorias helicoidales. Lo mismo se aplica a otros iones más pesados, recién creados por ionización. La cantidad de movimiento del viento solar al soplar hacia un cometa debe, por tanto, compartirse entre un número continuamente creciente de partículas, muchas de las cuales bastante pesadas. Este intercambio de cantidad de movimiento se llama carga másica y determina que el viento solar vaya remitiendo poco a poco.

A una distancia de 1,1 millones de kilómetros del núcleo, los detectores de partículas y el magnetómetro registraron, como se esperaba, un frente de choque procedente de la interacción entre el plasma del viento solar y el plasma del cometa: la velocidad de los iones del viento solar decrecía y su temperatura (o grado en que la velocidad de los distintos iones discrepaba al azar de la velocidad media de todos los iones) aumentaba, al propio tiempo, de manera espectacular. El espesor del frente de choque –la distancia a lo largo de la cual la velocidad de los iones del viento solar disminuía y su velocidad térmica aumentaba– era de 40.000 kilómetros.

El frente de choque no forma una barrera real entre el viento solar y los iones cometarios; el viento solar se limita a tornarse turbulento allí. La barrera final que impide que el viento solar se acerque más al núcleo está formada por el gas de moléculas e iones cometarios, que se mueven pausadamente en la ionopausa. Ni los iones del viento solar ni su campo magnético



3. INTERACCION entre un cometa y el viento solar. Las líneas de fuerza del campo magnético, "congeladas" en el viento solar, son incapaces de penetrar en la ionopausa; se acumulan, pues, ante ella y se pliegan a su alrededor (*arriba*). En la cara del cometa más alejada del Sol se forma una cola iónica. Abajo se representa la interacción en tres dimensiones, deducida de medidas realizadas durante el paso de la sonda *Giotto*.

pueden cruzar esa barrera y llegar hasta el gas puramente cometario situado al otro lado; se "acumulan" en la parte de fuera. De aquí que el campo magnético aumente conforme nos acercamos a la ionopausa: el instrumento MAG del *Giotto* midió una intensidad máxima del campo de 60 nanoteslas, a una distancia de unos 16.000 kilómetros del núcleo. (Por mor de comparación, señalemos que la intensidad del campo magnético interplanetario fuera de la cabellera era de ocho nanoteslas, y que la intensidad del campo magnético terrestre en los polos se cifraba en unas 60.000 nanoteslas.)

Como las líneas del campo magnético quedan detenidas en la ionopausa, por así decirlo, se pliegan a su alrededor. Este efecto crea la cola iónica, tejida de iones del viento solar y de iones cometarios que fluyen a lo largo de las líneas salientes del campo.

La sonda *Giotto* penetró, a través de la ionopausa, hasta el interior de la ionosfera del cometa. Fue la única que lo hizo. A unos 4600 kilómetros del núcleo cometario, los instrumentos de a bordo acusaron un campo magnético que tendía a cero y una temperatura de los iones que disminuía desde los 2000 grados Kelvin (grados Celsius por en-

cima del cero absoluto) hasta unos 300 K (más o menos, la temperatura en el interior de una casa). Estas caídas señalaban la ionopausa. Antes de la misión, nadie estaba en condiciones de predecir la posición de esta frontera entre la mezcla turbulenta de iones del viento solar e iones cometarios y la pura y fría ionosfera cometaria. Lisa y llanamente, se desconocían los valores de las variables que determinaban la posición de esta discontinuidad.

Gracias a la sensibilidad de los instrumentos instalados a bordo y a su atrevido acercamiento al núcleo, la misión *Giotto* contribuyó de forma muy destacada en la determinación de la composición de los gases neutros e ionizados de la cabellera. Era importante hacer estas medidas de los gases; la fracción de materia volátil del núcleo representa probablemente la mitad de la masa total del cometa, si no más. Tal materia se ha perdido en gran parte en los planetas terrestres, la Luna y los meteoritos.

Durante el vuelo del *Giotto* a través de la cabellera, el NMS detectó que el gas escapaba del núcleo a razón de unas 20 toneladas por segundo. Por tomar un punto de referencia, la masa total del cometa es de unos 100.000 millones de toneladas. El análisis y la interpretación de los datos no han concluido, aunque se han identificado ya bastantes especies moleculares "paternas" u originales. La combinación de los resultados obtenidos por NMS (que mide la concentración de moléculas neutras), el IMS (que determina las proporciones de iones) y los instrumentos ópticos (el experimento de sonda óptica, llamado OPE, y varios instrumentos a bordo de los *Vega*, en satélites en órbita alrededor de la Tierra y en el suelo) lleva a la conclusión de que el gas consta aproximadamente de un 80 por ciento de agua, 10 por ciento de monóxido de carbono, 3 por ciento de dióxido de carbono, 2 por ciento de metano, menos del 1,5 por ciento de amoniaco y 0,1 por ciento de ácido cianhídrico. El RPA, el NMS y el IMS, así como instrumentos de las sondas *Vega*, determinaron algunos iones más pesados, pero se desconoce todavía la naturaleza de las correspondientes moléculas paternas.

La medición del monóxido de carbono realizada por el NMS produjo un resultado de especial interés: la concentración de monóxido de carbono en relación con los otros gases aumenta con la distancia al núcleo. Esto significa que el monóxido de carbono gaseoso es expulsado del núcleo del cometa de manera desigual, o bien puede indicar que una cantidad apreciable del mismo se desprende de las minipartículas de polvo incluidas en un radio de 10.000 kilómetros del núcleo, cuando la luz solar las calienta. Esta segunda explicación implicaría que los granos de polvo retienen notablemente bien el monóxido de carbono, dentro quizá de moléculas mayores o polímeros.

Las mediciones isotópicas realizadas por el NMS revelaron concentraciones relativas de isótopos de azufre y oxígeno que, dentro de la incertidumbre experimental, concuerdan con las concentraciones en la Tierra y en los meteoritos. En el agua del cometa Halley, como en la de la Tierra y los meteoritos, hay mayor proporción de hidrógeno pesado que en el gas interestelar.

De la otra parte, no volátil, del cometa se pueden tomar muestras en forma de polvo cometario. Aglomeradas al principio en el hielo del núcleo co-

EXPERIMENTO Y ABREVIATURA	OBJETIVOS CIENTIFICOS	INVESTIGADOR PRINCIPAL E INSTITUCION RESPONSABLE
CAMARA HMC	Obtener fotografías de alta resolución del núcleo y del gas y el polvo.	H. Uwe Keller Instituto Max Planck de Aeronomía, Lindau
ESPECTROMETRO DE MASAS PARA MOLECULAS NEUTRAS NMS	Determinar la composición, densidad y velocidad de los gases neutros y de los iones cometarios de baja energía.	Dieter Krankowsky Instituto Max Planck de Física nuclear, Heidelberg
ESPECTROMETRO DE MASAS IONICAS IMS	Determinar la composición, densidad, energía y distribución angular de los iones del viento solar y del plasma cometario.	Hans Balsiger Universidad de Berna
ESPECTROMETRO DE MASAS IONICAS PIA	Determinar la composición y la masa de las partículas cometarias de polvo.	Jochen Kissel Instituto Max Planck de Física nuclear, Heidelberg
SISTEMA DETECTOR DE IMPACTO DE POLVO DID	Determinar la abundancia y distribución de masas de las partículas de polvo.	J. Anthony M. McDonnell Universidad de Kent
ANALISIS DEL PLASMA 1 JPA	Determinar la energía y distribución angular de los iones con alta resolución en el tiempo; determinar la composición de los iones capturados.	Alan Johnstone Laboratorio Mullard de ciencia espacial, Holmbury, St. Mary
ANALISIS DEL PLASMA 2 RPA	Determinar la energía y distribución angular de electrones con alta resolución en el tiempo; determinar la composición de aglomeraciones frías de iones.	Henri Rème Centro para el estudio de la radiación del espacio, Toulouse
ANALIZADOR DE PARTICULAS DE ALTA ENERGIA EPA	Determinar la energía y distribución angular de partículas cargadas de alta energía (por encima de 20 keV).	Susan M. P. McKenna-Lawlor Colegio de San Patricio, Maynooth
MAGNETOMETRO MAG	Medir el campo magnético con alta resolución en el tiempo.	Fritz M. Neubauer Universidad de Colonia
EXPERIMENTO DE SONDA OPTICA OPE	Medir la distribución del gas y el polvo (CN y OH).	Anni Chantal Levasseur-Regourd Centro nacional francés de Investigación Científica, Verrières-le-Buisson
EXPERIMENTO DE RADIOCIENCIA GRE	Medir la densidad del gas y el polvo a lo largo de la trayectoria del vehículo espacial.	Peter Edenhofer Universidad de Bochum

4. INSTRUMENTOS EMBARCADOS EN LA SONDA ESPACIAL *Giotto*, enviada por la Agencia Espacial Europea. La tabla señala el nombre, el objetivo científico y el investigador principal de cada uno.

metario, se van expulsando del núcleo las partículas de polvo con la sublimación del hielo y la expansión consiguiente de los gases. Las trayectorias de las partículas en el interior de la cabellera quedan determinadas por la dirección inicial en la que abandonan el núcleo (la dirección de la salida del gas) y por la dirección de la presión de radiación solar.

Para las partículas menores –las que tienen un diámetro inferior a un micrometro, o millonésima de metro–, la presión de radiación solar domina sobre la atracción gravitatoria. Estas partículas, impulsadas hacia el lado opuesto al Sol, producen la cola de polvo que se percibe con toda nitidez en muchos cometas. Para partículas mayores, la atracción gravitatoria del Sol sobrepasa la presión de radiación y las partículas quedan cerca de la trayectoria orbital del cometa. El núcleo emite las partículas en varias direcciones y, así, describen órbitas en torno al Sol a velocidades algo diferentes. Con el tiempo, se forma una ancha corriente de partículas que se va extendiendo continuamente a lo largo del camino orbital. De esta manera se crea una corriente de meteoros. Se trata del conocido "chubasco de meteoros", que debe esa denominación a la apariencia que toma cuando penetra en la atmósfera terrestre. Algunas partículas sobreviven al rozamiento con la atmósfera. Durante algún tiempo, tales partículas quedan en la estratosfera, lo que ha proporcionado los primeros indicios sobre la estructura y composición del polvo cometario.

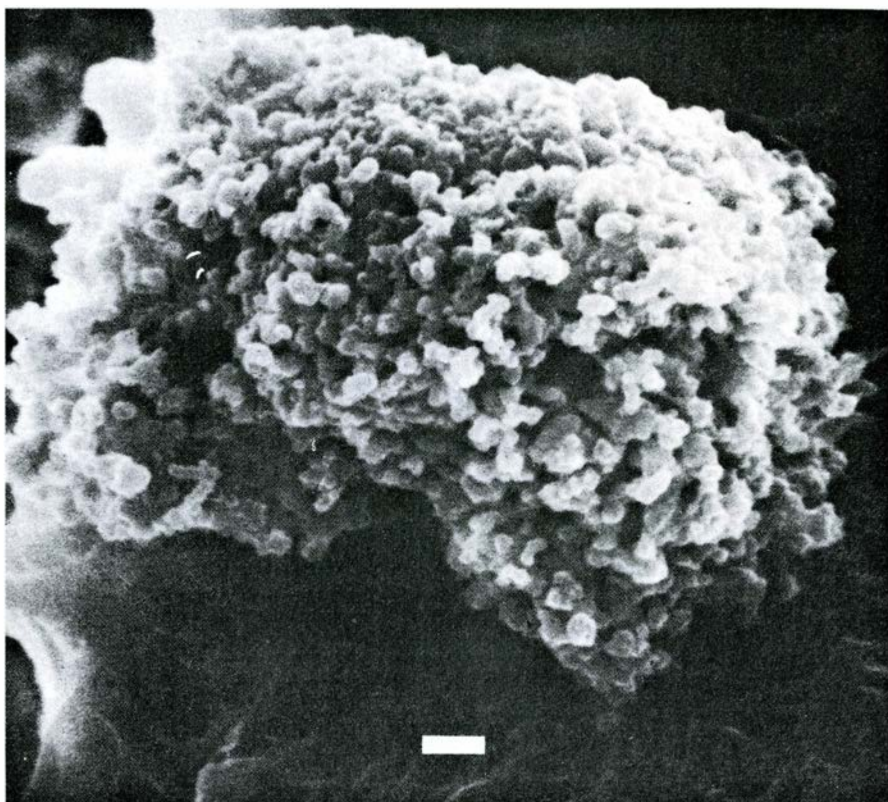
El cometa Halley ha creado una corriente de meteoros, atravesada por la Tierra dos veces al año y desencadenando así con ello dos chubascos anuales de meteoros, las Oriónidas en octubre y las eta-Acuáridas en mayo.

Cuando la sonda *Giotto* atravesó la cabellera del Halley, el polvo se estaba emitiendo a razón de tres a diez toneladas por segundo. Cálculo que se funda en las mediciones de los tamaños y masas de las partículas de polvo que recogió la sonda, determinadas por el instrumento DID, y en la deceleración de la sonda, medida por el GRE. Si el cometa sufre tan alta tasa de pérdida durante los contados meses en que se encuentra próximo al Sol, deberá entonces perder del orden de 100 millones de toneladas de materia en el curso de cada órbita. Con una masa total de 100.000 millones de toneladas, el cometa Halley puede esperar cientos de felices retornos.

Los analizadores de impacto de partículas a bordo de la sonda *Giotto* (el PIA), *Vega-1* y *Vega-2* examinaron la composición química de miles de partículas de polvo cuyos diámetros estaban comprendidos entre 0,1 y 10 micrometros. El polvo es una mezcla de una substancia ligera constituida por hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno y una materia pesada y rocosa constituida principalmente por magnesio, silicio, hierro y oxígeno.

La relación entre materia ligera y materia rocosa varía bastante de un grano a otro. Constituyó una sorpresa para nosotros descubrir que la materia ligera sobrevive largos períodos, cuando el Sol calienta las partículas de polvo. Obviamente, parte de la materia ligera toma la forma de substancias orgánicas polimerizadas, que parecen actuar como un pegamento, uniendo entre sí las partículas de polvo pequeñas para formar otras mayores. El tamaño insignificante de los granos cometarios, amén de sus características físicas y químicas, recuerda ciertos modelos que describen los granos de polvo interestelares [*véase* "Estructura y evolución de los granos interestelares", por J. Mayo Greenberg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1984].

Las relaciones de los diversos isótopos de los distintos elementos –carbono, magnesio, silicio y hierro– en el polvo cometario están en buen acuerdo general con las relaciones isotópicas que caracterizan al Sistema Solar. Se encontró concordancia en la fase gaseosa; este resultado constituyó una de las principales pruebas en favor de la tesis según la cual el polvo del cometa Halley se formó de la misma materia que el resto del Sistema Solar.

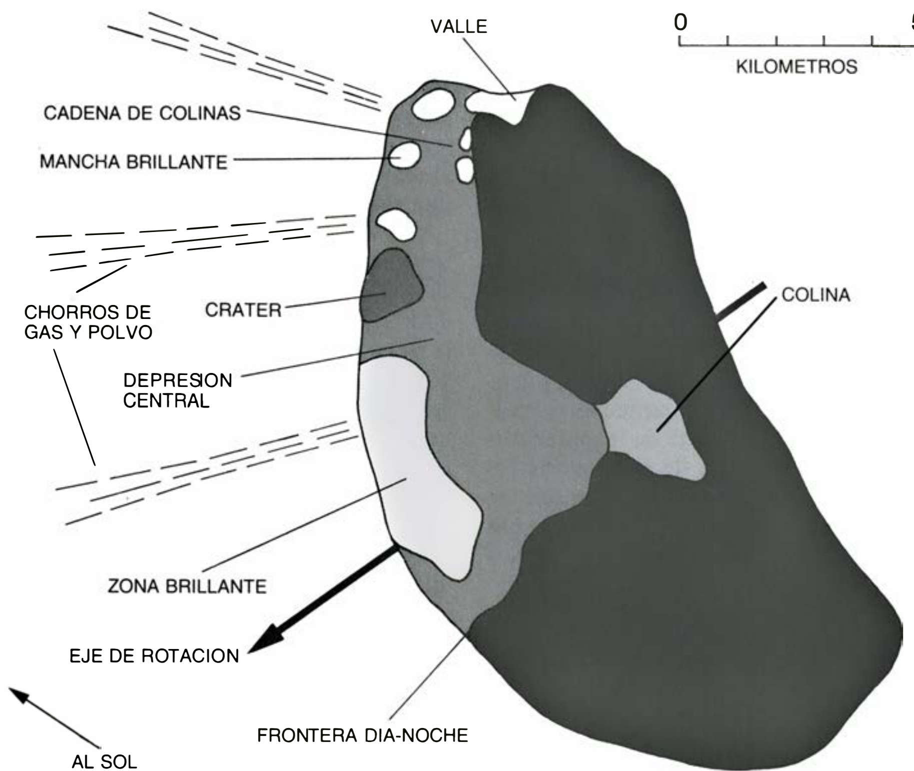


5. PARTICULA DE BROWNLEE, corpúsculo de polvo hallado en la atmósfera terrestre que, probablemente, se formó del polvo expulsado por los cometas en el espacio interplanetario. La composición de las partículas de Brownlee corresponde a la de la componente pétrea de las partículas de polvo cometario. Su estructura esponjosa les confiere una densidad muy baja (un gramo por cm^3), a pesar de su composición rocosa. La barra blanca (*abajo*) corresponde a una longitud de un micrometro, o millonésima de metro.

El momento culminante del viaje del *Giotto* al cometa Halley fue, sin duda, el paso del vehículo espacial por la proximidad de la fuente de gas y polvo: el propio núcleo. Hasta las misiones Halley, no se había fotografiado nunca ningún núcleo cometario: una región bastante pequeña que está velada, además, por la cabellera. Ello no obstaba para que las investigaciones sobre las cabelleras hubieran aportado una considerable cantidad de información relativa al núcleo.

Las misiones al cometa Halley han confirmado cabalmente las características esenciales del modelo aceptado de núcleo cometario: el modelo de "bola de nieve sucia". La hipótesis, desarrollada hace unos 40 años por el astrofísico norteamericano Fred L. Whipple, postula que el núcleo, un objeto único y sólido, consta de hielo de agua, otros





6. NUCLEO DEL COMETA HALLEY fotografiado por la Cámara Multicolor Halley, ilustrada a bordo de la sonda *Giotto*. La imagen de la parte superior es una composición de seis fotografías. El color se añadió arbitrariamente. El mapa de la parte inferior recoge los rasgos importantes del núcleo cometario.

hielos y partículas de polvo. Whipple supuso que el núcleo no era completamente compacto, sino que presentaba una estructura esponjosa. Pensó, asimismo, que el lado del núcleo expuesto al Sol desprendía gas y polvo homogéneamente desde una considerable porción de su superficie. Las fotografías tomadas por la sonda *Giotto* corroboran, en sus líneas generales, el modelo de Whipple, pero descubren también algunas sorpresas inesperadas. La superficie del núcleo del cometa Halley es irregular y está llena de hoyos. Brillantes chorros, o corrientes, de gas y polvo borbotean en la superficie del núcleo. Además, los datos químicos obtenidos por el *Giotto* y las sondas *Vega* muestran que el núcleo está constituido por tres factores: los hielos, la componente rocosa y una materia ligera y resistente al calor que contiene probablemente compuestos orgánicos polimerizados.

Basándose en las fotografías, se han estimado las dimensiones del núcleo en 16 × 8 × 8 kilómetros. La forma recuerda un cacahuete o una patata. Combinando fotografías del *Giotto* y del *Vega-1*, se construyó un modelo tridimensional del núcleo del Halley, del cual se dedujo un volumen de unos 500 kilómetros cúbicos. Con una masa de unos 100.000 millones de toneladas, inferimos una densidad de entre 0,1 y 0,3 gramos por centímetro cúbico. (El agua tiene una densidad de un gramo por centímetro cúbico.)

El área de la superficie del núcleo viene a multiplicar por cuatro la extensión que se le suponía. Esto significa que el albedo (el porcentaje de luz solar incidente que se refleja) es bastante menor del atribuido. El bajo albedo (cuatro por ciento) significa que el cometa Halley es el objeto conocido más oscuro del Sistema Solar.

Los chorros encerraban otra sorpresa. Parecen emitidos por una fracción bastante pequeña –alrededor de un 10 por ciento– de la superficie total del cometa. Casi el 90 por ciento de la superficie estaba inactiva en el momento de las observaciones; por otro lado, una buena extensión de la misma se muestra cubierta por una costra de espesor y estructura desconocidos. Antes de las misiones espaciales, se sabía que los chorros eran fuente de emisiones de gas y polvo desde el núcleo, pero su papel predominante no se reveló hasta el análisis de las fotografías tomadas por las sondas espaciales. Se cree que el gas y el polvo que abandonan el cometa lo hacen, en buena parte, en forma de chorros.

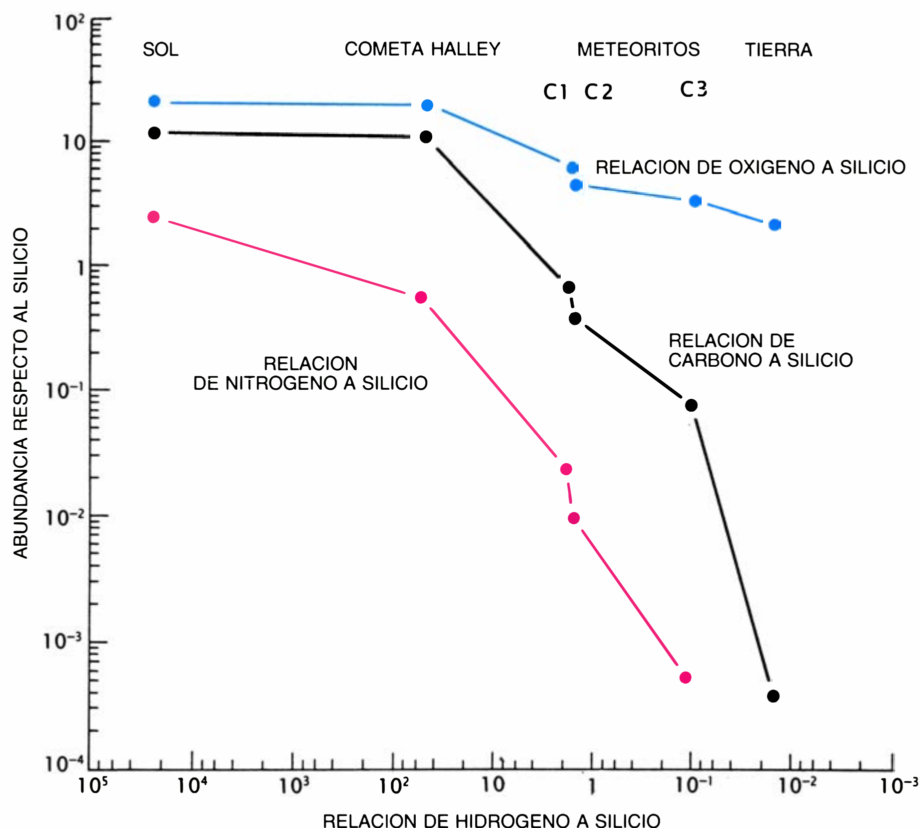
Los análisis del gas y el polvo de la cabellera pretendían, en definitiva, determinar la composición química del núcleo. La naturaleza de la cabellera no es necesariamente la misma que la del núcleo, ya que la composición del gas y el polvo que sale en forma de chorros del núcleo puede depender de las condiciones reinantes en la fuente del chorro. Ahora bien, la mezcla de elementos que aparecía en la materia emitida por el cometa durante las pasadas de *Vega-1*, *Vega-2* y *Giotto* aportó valiosa información sobre la composición del núcleo. Podemos extraer ya varias conclusiones de los datos.

En primer lugar, la proporción de elementos volátiles es allí mucho más alta que en la Tierra y los meteoritos; ello concuerda con la formación del cometa en las regiones más frías y exteriores de la nebulosa solar.

En segundo lugar, las concentraciones de carbono, nitrógeno y de moléculas que contienen esos elementos revisten un interés especial. En el ambiente rico en hidrógeno de la nebulosa solar, las reacciones químicas tienden a producir metano y amoniaco, compuestos en los que aquellos elementos se hallan en un estado "reducido"; es decir, están ligados a átomos de hidrógeno. Resultó una sorpresa que en la materia emitida por el cometa esos dos compuestos sean muy poco abundantes. Antes bien, una considerable proporción del carbono está en forma oxidada (ligado a átomos de oxígeno) y hay mucho menos nitrógeno del que podría esperarse. Esto indica que las reacciones químicas en las porciones exteriores de la nebulosa solar no eran muy eficaces para reagrupar las moléculas que contenían carbono y nitrógeno.

Los descubrimientos nos traen, pues, lo que cabría esperar en densas nubes interestelares, donde las bajas temperaturas crean una química poco corriente. En esas nubes interestelares, las moléculas neutras no pueden reaccionar fácilmente entre sí; la química está, por tanto, dominada por reacciones entre moléculas neutras y las pequeñas trazas de iones que se encuentran presentes. Debido a ello, en la fase gaseosa de las nubes el nitrógeno se halla sobre todo en forma molecular, el carbono se encuentra generalmente en forma de monóxido de carbono o substancias relacionadas con él y las moléculas condensables están enriquecidas en deuterio (el isótopo pesado del hidrógeno).

Peculiaridades químicas que se ponen de manifiesto en la mezcla de substancias volátiles del cometa Halley. En



7. CONCENTRACION RELATIVA de los elementos clave en la materia emitida por el Halley, comparada con su concentración en otros cuerpos. La relación de polvo a gas en la fuente (el propio cometa) se supuso de dos a uno. Las concentraciones relativas de los elementos en el cometa son próximas a las que se encuentran en el Sol, mientras que las abundancias relativas halladas en la Tierra y en tres clases de condritas carbonáceas no lo son. Este resultado confirma la hipótesis según la cual los cometas constan de materia muy primitiva, en la que se ha perdido la parte correspondiente a los elementos volátiles hidrógeno y nitrógeno.

el agua del cometa, la concentración de deuterio supera de cinco a diez veces el promedio interestelar; el grupo del NMS halló mucho carbono en forma de monóxido. La baja abundancia de nitrógeno refleja la peculiar forma química que el nitrógeno adquiere en las nubes interestelares. Resulta difícil que el nitrógeno molecular se combine o condense; cabe también la posibilidad de que el cometa perdiera el nitrógeno o bien que ni siquiera llegara a incorporarlo.

Estos descubrimientos, una vez se hayan depurado y analizado a fondo, habrán de servirnos para reconstruir el origen del Sistema Solar. Al menos en las partes exteriores del primitivo Sistema Solar, los procesos físicos y químicos debieron avanzar muy despacio, hasta el extremo de que ciertos enlaces químicos más antiguos que el Sol pudieran haber sobrevivido a la formación de la nebulosa solar (y, por supuesto, a la formación del cometa Halley). De aquí que la química de los cometas nos proporcione un eslabón entre el Sistema Solar y su predecesor, una oscura nube molecular sin nombre, dispersada hace ya muchísimo tiempo.

Los resultados obtenidos por las sondas Halley representan un importante hito en nuestro conocimiento de la naturaleza de los cometas y, por extensión, del Sistema Solar en su totalidad. Habrán de seguirle sondas dirigidas a otros cometas. En particular, los datos enviados por la sonda *Giotto* desde las profundidades de la cabellera del Halley demuestran que valdría la pena traer a la Tierra muestras de materia cometaria para su análisis mediante las modernas técnicas de laboratorio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE STRUCTURE OF THE CLOUD OF COMETS SURROUNDING THE SOLAR SYSTEM, AND A HYPOTHESIS CONCERNING ITS ORIGIN. J. H. Oort en *Bulletin of the Astronomical Institute of the Netherlands*, vol. 11, n.º 408, págs. 91-110; 13 de enero de 1950.

A COMET MODEL. I: THE ACCELERATION OF COMET ENCKE. Fred L. Whipple en *The Astrophysical Journal*, vol. 111, n.º 2, páginas 375-394; marzo de 1950.

ENCOUNTERS WITH COMET HALLEY: THE FIRST RESULTS. En *Nature*, vol. 321, n.º 6067, suplemento, págs. 259-366; 15 de mayo de 1986.

PROCEEDINGS OF THE 20TH ESLAB SYMPOSIUM, HEIDELBERG, OCTOBER, 1986. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 187, noviembre de 1987.

Fósiles de Montceau-les-Mines

Hace trescientos millones de años, el centro de Francia se hallaba en el ecuador. Un magnífico yacimiento de fósiles nos ha permitido reconstruir la paleoecología de ese mundo pretérito

Daniel Heyler y Cecile M. Poplin

El final de la era paleozoica, hace unos 300 millones de años, fue época de transición. El período Carbonífero, durante el cual los continentes se congregaban en extensiones de tierra próximas al ecuador y un clima cálido y húmedo sustentaba los bosques pantanosos que dieron lugar a las principales reservas de carbón actuales, estaba llegando a su fin. El mundo acababa de entrar en el período Pérmico, en el que el calor húmedo daría paso a un clima frío y árido, y en el que los primeros reptiles antepasados de los mamíferos comenzarían a poblar los continentes.

En aquella época, el centro de Francia era una región montañosa, de colinas cubiertas de helechos gigantes y coníferas, y de tierras bajas, salpicadas de ríos, lagos y lagunas. Por sus suelos se arrastraban miriápodos, escorpiones, insectos, anfibios con aspecto de salamandra y reptiles. Las aguas hervían de gusanos, crustáceos, moluscos, tiburones y peces ancestrales. Cuando estas criaturas morían, sus cuerpos se hundían en el fondo de los pantanos, donde perseveraban hasta su transformación fósil.

Durante el siglo XIX, se descubrieron algunas de estas plantas y animales fósiles en la cuenca carbonífera de Montceau-les-Mines, situada al noreste del Macizo Central, una cadena montañosa formada durante el Paleozoico, más o menos contemporánea de los Apalaches. Sin embago, la magnitud del depósito fósil se puso de manifiesto hace tan sólo unos 10 años, a raíz de los trabajos mineros realizados en el lugar. Muchos paleontólogos coinciden en afirmar que nos hallamos ante uno de los principales descubrimientos de la década. Galvanizados por la inminente destrucción del lugar, paleontólogos aficionados locales convergieron en la mina y, durante los fines de semana, lucharon por salvar el material fósil antes de que lo moliera la maquinaria.

DANIEL HEYLER y CECILE M. POPLIN son paleontólogos del Museo de Historia Natural de París. Ambos comparten el mismo interés por los vertebrados del Paleozoico superior. Heyler está especializado en peces, anfibios y huellas de tetrápodos fósiles procedentes de las cuencas continentales de Europa occidental. Poplin estudia los peces fósiles de Norteamérica, aunque ha trabajado también en el examen de peces europeos y chinos, así como en el de mamíferos primitivos de Mongolia.

En colaboración con el instituto paleontológico del Museo de Historia Natural de París y con el Museo de Historia Natural de Autun, localidad cercana a Montceau, los aficionados recogieron 7000 planchas de pizarra y más de 100.000 nódulos, la mayoría con fósiles en su interior. Registraron cuidadosamente la localización y orientación en que hallaron cada nódulo. Más tarde, identificados ya los fósiles, su puntilloso registro permitió reconstruir su distribución en las capas fosilíferas. Fue la primera vez que se emplearon métodos modernos de excavación tan precisos en depósitos de esa antigüedad.

La mina, hoy abandonada, se taponó. Mas, para los científicos implicados, el examen de los especímenes rescatados no ha concluido todavía. Sólo se ha abierto una cuarta parte de los nódulos; un 22 por ciento de los cuales encerraba animales fósiles en buen estado de conservación. Los hay que se han mantenido espléndidamente, entre ellos, ninfas de insectos y gusanos de cuerpo blando, que muy raramente se encuentran en estado fósil. El trabajo de investigación coordinado por los autores y subvencionado por el Centro Nacional para la Investigación Científica (CNRS) posibilitó la creación de un equipo internacional de especialistas que examinó el primer lote de fósiles. A ellos les debemos la reconstrucción de las notas esenciales de la comunidad vegetal y animal del lugar y sus alrededores. Se llevan ya identificadas unas 300 especies de plantas y polen, así como 16 clases de animales que abarcan unos 30 géneros.

Estos fósiles representan un segmento del pasado geológico de la Tierra, que se extiende desde finales del Carbonífero hasta comienzos del Pérmico. Durante ese tiempo, el clima de la región se hizo más templado; la flora y la fauna experimentaron cambios que mejoraron su adaptación a un clima más árido. En esa línea, este depósito documenta la transición de especies a lo largo de un período crítico en la historia de la Tierra.

Los fósiles de la cuenca de Montceau yacen en depósitos pizarrosos formados cuando animales y plantas quedaron aplastados entre capas de sedimento o bien se hallan encerrados en nódulos. No conocemos los pormenores del proceso en virtud del cual se formaron estos últimos, aunque se cree que cualquier organismo puede actuar de núcleo en cuyo entorno se aglutinen los finos sedimentos que integran el nódulo. Los fósiles hallados en nódulos —que se encuentran también en Mazon Creek, cerca de Chicago, y en otros lugares de la misma edad, así como en yacimientos de edad posterior, como en los materiales triásicos de Madagascar o en los cretácicos de la brasileña Ceará— son más tridimensionales y, por ello, dan una imagen más clara de la morfología general del organismo.

Los grupos zoológicos representados en los fósiles de Montceau varían bastante en lo que al número de individuos se refiere. Sin embargo, y por distintas razones, este número no refleja exac-

tamente las poblaciones faunísticas de la cuenca original. En primer lugar, los animales de cuerpo blando no suelen conservarse con la facilidad característica de los animales con partes duras, tales como conchas o huesos. En segundo lugar, la velocidad de los trabajos mineros hizo imposible recolectar todos los fósiles. Por último, la mina es sólo una parte de la cuenca geológica. Sin embargo, y debido a la importante cantidad, calidad y diversidad de los ejemplares recuperados, Montceau resiste bien la comparación con el famoso yacimiento de Mazon Creek y con el de Bear Gulch, este último en el estado de Montana (cuya fauna viene a ser de unos 15 millones de años más antigua).

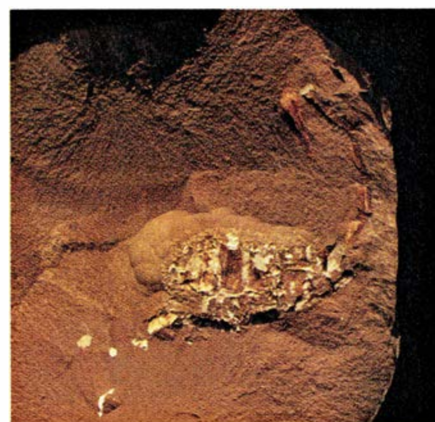
Las capas primeras de Montceau se depositaron en las postrimerías del Carbonífero, que comenzó hace 345 millones de años y acabó unos 65 millones de años más tarde. Este período es el responsable de las reservas mundiales de carbón.

Durante el período siguiente, el Pérmico, que se inició hace 280 millones de años y duró 50 millones de años, la formación del carbón disminuyó notablemente, al enfriarse el clima y tornarse más seco. Esa es la razón de que escasee el carbón pérmico. La transición del Carbonífero al Pérmico no conoció ningún cambio geológico abrup-









1. ANIMALES que medraron en el Carbonífero superior, hace unos 300 millones de años, se han conservado en estado fósil en Montceau-les-Mines. Nos han llegado, en magníficas condiciones, estas alas externa e interna (*arriba, izquierda*) de un insecto extinto: *Microdictya heylery*. Una de las numerosas ninfas de insectos halladas en esta localidad es una ninfa de cucaracha (*abajo, izquierda*). Encerrado en el interior de un nódulo distinguimos un onicóforo (*arriba, derecha*), animal que comparte rasgos de gusanos y artrópodos. Sus descendientes actuales se asemejan a orugas aterciopeladas. Un escorpión paleozoico (*abajo, derecha*) evidencia su parecido con sus descendientes actuales; podemos distinguir con nitidez la glándula venenosa y el aguijón.



2. CAPAS DE CARBON CON FOSILES expuestas en una mina a cielo abierto en Montceau-les-Mines, situada a unos trescientos kilómetros al sureste de París. En dos años fueron extraídos, por aficionados locales a la paleontología, unas 7000 planchas de pizarra y unos 10.000 nódulos portadores de fósiles. La mayoría de los nódulos permanece todavía sin abrir en el desván del Museo de Historia Nacional de Autun.





3. CALAMITES (*izquierda*), semejante a las actuales colas de caballo. Creció hasta alcanzar la altura de los árboles en los bosques del Carbonífero. Estas plantas carecían de flores y semillas; se reproducían por esporas. Había también helechos gigantes (*como el que se ilustra a la derecha*) que se reproducían por semillas.

to, lo que explica que no esté registrada por un límite estratigráfico. Para asignar un depósito a esta transición debemos encaminar nuestros pasos a la paleontología y, en particular, a la paleobotánica.

La flora fósil, antes que la fauna, nos permitió datar las capas inferiores de Montceau dentro de la edad estefaniense (último piso del Carbonífero) y, las capas superiores, en la autuniense (primer piso del Pérmico). La evolución de la flora durante el lapso de tiempo representado en los materiales de Montceau atestigua el cambio climático que aconteció entre estos dos períodos geológicos.

Las plantas fósiles abundan en Montceau. Casi 300 especies pertenecen a los antiguos grupos que precedieron a la flora moderna productora de semillas. Algunas parecen colas de caballo y helechos gigantes, que alcanzaron proporciones arbóreas en los bosques carboníferos. Estas plantas se reproducían por esporas; dejaron en Montceau algunos troncos *in situ* y numerosas hojas. Las plantas del género *Alethopteris*, filiciformes y gigantescas, se reproducían ya por medio de un óvulo u órgano en forma de semilla. Este grupo de helechos con semilla, así se le conoce, medró durante el Carbonífero y el Pérmico y reviste una importancia capital para comprender la evolución de las plantas con semilla. Otras plantas más desarrolladas, piénsese en las primeras coníferas, que habían aparecido durante el Carbonífero superior, estaban ya en escena. A medida que ascendemos hacia estratos más recientes en Montceau, las coníferas tienden a reemplazar a los demás grupos, señal probable del advenimiento de un clima más frío y seco.

El grupo más numeroso y mejor conservado de la fauna de Montceau es, sin duda, el de los artrópodos. A finales del Carbonífero, este *phylum* se había dividido ya en una media docena de clases primitivas. Los artrópodos acuáticos son, indudablemente, los más numerosos; sólo los crustáceos representan el 43 por ciento de la fauna examinada hasta el momento. Estos últimos fueron estudiados por Sylvie Secrétan, del Museo de Historia Natural de París, Frederick R. Schram, del Museo de Historia Natural de San Diego, y por W. D. Ian Rolfe, de la Universidad de Glasgow. Se cuentan, entre ellos, unos 2000 ejemplares de sincáridos —organismos primitivos semejantes a camarones que todavía existen—



4. FOSILES DE PECES ACTINOPTERIGIOS hallados en la cuenca de Autun. En Montceau, a unos veinte kilómetros de distancia, fueron hallados ejemplares similares a éstos. Los lagos de las dos cuencas estuvieron probablemente conectados en alguna ocasión. Este pez estaba cubierto de escamas muy duras.

y ostrácodos, crustáceos diminutos y dotados de conchas bivalvas que perviven hoy en aguas dulces y saladas. Robert Feys, de la Oficina Francesa para la Investigación Geológica y Minera, estudió las esterias, otro crustáceo bivalvo.

Los euticarcinoides constituyen un grupo poco común de artrópodos acuáticos. Parecidos a miriápodos con cola, atrajeron la atención de los especialistas cuando fueron descubiertos en Montceau; posteriormente, este hallazgo condujo al descubrimiento del mismo género (*Sottyxerxes*) en Mazon Creek. También se recuperaron en Montceau 45 ejemplares de xifosuros, todavía por estudiar a pesar de haberlos ya identificado. En este grupo se incluye el cangrejo de herradura.

Los artrópodos terrestres hallados en Montceau abarcan los principales grupos que perviven hoy. Hay miriápodos, estudiados por John E. Almond, de la Universidad de Cambridge, así como arañas y escorpiones. Los fósiles de escorpiones, estudiados por uno de nosotros (Heyler) y Maxime A. Vachon, del Museo de Historia Natural de París, nos han llegado, en muchos casos, en muy buen estado, conservando la glándula venenosa y el aguijón. Se encontró también un grupo extinto de artrópodos terrestres, los artropléuridos; parecidos a enormes cochinillas, se les ha visto sólo en las cuencas carboníferas. Los cinco ejemplares de Montceau, estudiados por Derek E. Briggs, de la Universidad de Bristol,





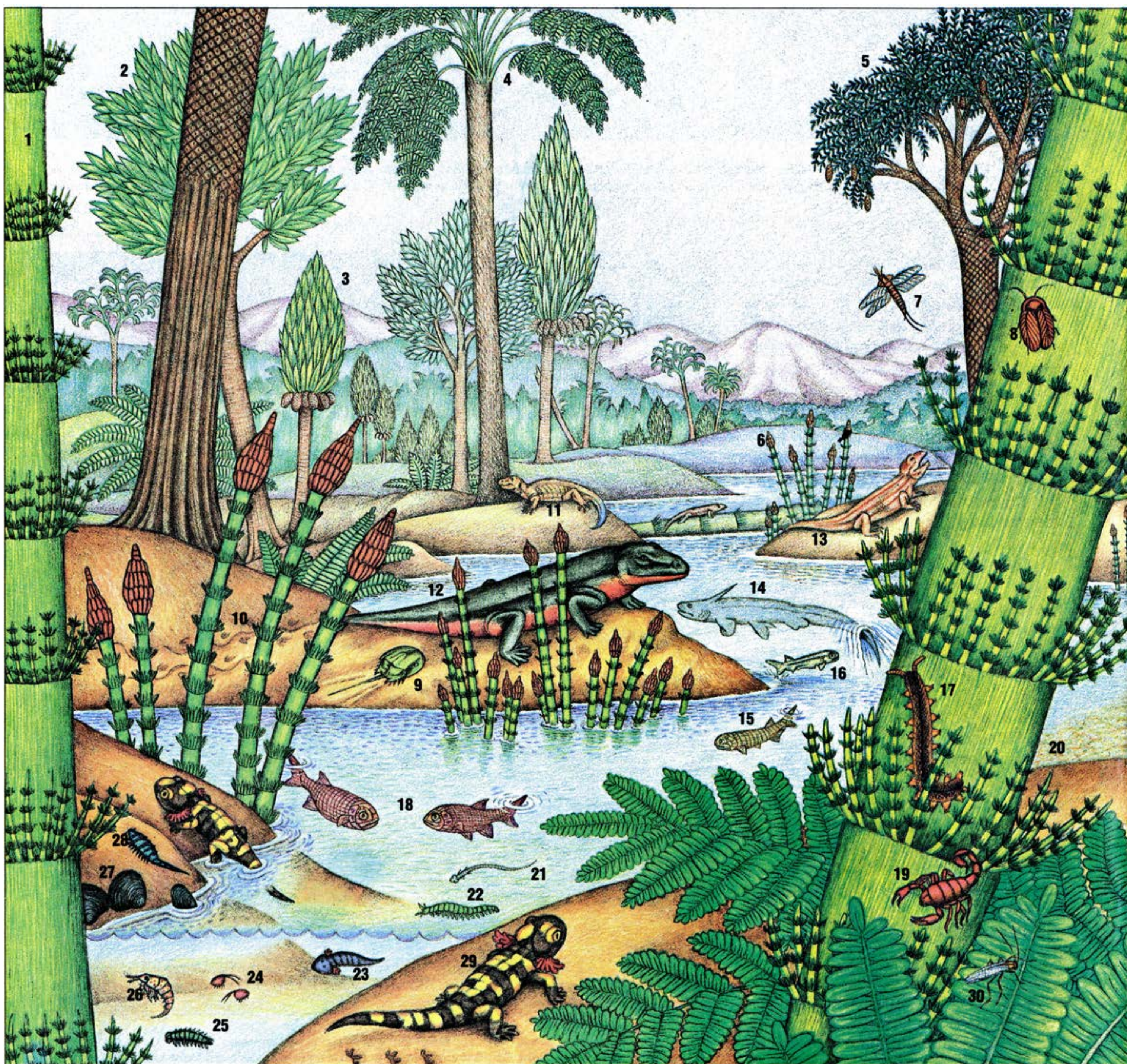


5. HUELLAS FOSILES que registran el paso de un anfibio o reptil primitivo. Arrastraba su cola dejando una traza sinuosa (*arriba*). Concentrados en el mismo punto de un estrato carbonífero se hallaron fósiles de larvas de branquiosaurios (*centro*). Recuerdan a los renacuajos de los anfibios modernos. El de la fotografía mide unos dos centímetros de longitud. Los fósiles de animales maduros, con patas ya desarrolladas (*abajo*), escasean en Montceau-les-Mines. Este ejemplar de branquiosaurio tiene siete centímetros de longitud.

son los artropléuridos más pequeños y completos encontrados hasta la fecha; pertenecen, probablemente, a especies nuevas.

Los insectos, investigados por Laurie Burnham, de la Universidad de Harvard, ofrecen una gama amplísima. Aparecen los primeros en el registro fósil a comienzos del Carbonífero superior, hace unos 320 millones de años; en Montceau, sólo 20 millones de años más tarde, están ya representados por ocho órdenes. Estos fósiles, que datan de una época en la que las plantas terrestres y otras formas de vida estaban diversificadas, representan un importante estadio en la evolución de los insectos. En Montceau se ha recuperado una ingente cantidad de insectos en distintas fases de desarrollo, algunos de ellos con estuches alares en formación. Se espera que estas formas ninfales, objeto todavía de investigación, aumenten nuestro conocimiento de la evolución sufrida por las alas de los insectos.

Otro descubrimiento extraordinario fue el hallazgo de dos fósiles de onicóforos, animales que muestran un parecido superficial con las grandes orugas. En la actualidad, estos animales son sumamente raros y viven en América central, el Caribe y la región indoaustraliana. Se ha vertido mucha tinta acerca de sus afinidades, ya que comparten caracteres propios de gusa-



6. AMPLIA DIVERSIDAD de formas orgánicas en el paisaje, húmedo y cálido, del Macizo Central francés durante el Carbonífero superior. Esta región estaba salpicada de colinas, ríos y lagos. Los restos fósiles sugieren que estas plantas y animales medraban en un ambiente estuarino. Las especies mostradas

nos anélidos y de artrópodos. Durante algún tiempo se los supuso antepasados de todos los artrópodos; pero la idea ha perdido fuerza. En cualquier caso, los onicóforos son verdaderas reliquias del Paleozoico inferior y no parece que su morfología haya cambiado gran cosa en los últimos 500 millones de años.

En Montceau abunda otro grupo de invertebrados: los moluscos bivalvos, estudiados por Claude Babin, de la Universidad de Brest. Todos los ejemplares hallados pertenecen a una única especie, *Anthraconaia lusitanica*, que, en aquella época, gozó de amplia distribución por toda Europa, desde Polonia hasta la Península Ibérica. Este molusco, que es uno de los fósiles-guía clásicos, ha permitido asignar las capas de Montceau, donde fue hallado, al Carbonífero superior. Más inusual ha sido el descubrimiento de anélidos poliquetos, gusanos segmentados con apéndices carnosos en forma de paleta que sobresalen de cada segmento. Sus cuerpos están formados exclusivamente por tejido blando, pero merced a su excepcional conservación en los nódulos se han encontrado 72 ejemplares.

1. ***CRUCICALAMITES*** **(COLA DE CABALLO GIGANTE)**
2. ***CORDAITES*** **(PLANTA CON SEMILLAS PRIMITIVA)**
3. ***SIGILLARIA*** **(PLANTA LICOPODIAL)**
4. ***PECOPTERIS*** **(HELECHO CON SEMILLAS)**
5. ***LEPIDODENDRON*** **(PLANTA LICOPODIAL)**
6. ***STYLOCALMITES*** **(COLA DE CABALLO GIGANTE)**
7. ***MICRODICTYA HEYLERI*** **(INSECTO EXTINTO)**
8. **CUCARACHA**
9. **XIFOSURO ("CANGREJO DE HERRADURA")**
10. **HUELLAS DE TETRAPODO**
11. ***STEREORACHIS DOMINANS*** **(REPTIL)**
12. ***ACTINODON FROSSARDI*** **(ANFIBIO)**
13. ***CALLIBRACHION GAUDRYI*** **(REPTIL)**
14. ***XENACANTHUS*** **(TIBURON)**
15. ***COMMENTRYA*** **(PEZ ACTINOPTERIGIO)**
16. ***ACANTHODES*** **(PEZ ACANTODIDO)**
17. **ONICOFORO**
18. ***AEDUELLA BLAINVILLEI*** **(PEZ ACTINOPTERIGIO)**
19. ***BUTHISCORPIUS*** **(ESCORPION)**
20. ***BOTRYOCOCCUS*** **(BACTERIA)**
21. ***SAURAVUS CAMBRAYI*** **(REPTIL)**
22. **GUSANO POLIQUETO**
23. **RENACUAJO DE *BRANCHIOSAURUS* (ANFIBIO)**
24. **OSTRACODO (CRUSTACEO BIVALVO)**
25. **ARTROPLEURIDO**
26. ***PALAEOCARIS*** **(SINCARIDO)**
27. ***ESTHERIA*** **(CRUSTACEO BIVALVO)**
28. ***KOTTIXERXES GEREM*** **(ANFIBIO)**
29. ***BRANCHIOSAURUS*** **(ANFIBIO)**
30. ***APSIDONEURA SOTTYI*** **(INSECTO)**

en la figura, escogidas entre las representativas, no están dibujadas a escala. (Dibujo de P. J. Wynne.)

Los vertebrados hallados en Montceau pertenecen, al menos, a cuatro grupos: peces óseos, peces cartilaginosos, anfibios y reptiles. Los peces son los más numerosos. Los acantódidos, primeros peces mandibulados del registro fósil, están representados en el yacimiento por ejemplares que miden de 20 a 50 centímetros de longitud. Su aleta caudal recuerda la de los tiburones. Portaban las aletas provistas de espinas robustas que sus depredadores debían encontrar sumamente difíciles de engullir. Desaparecieron sin descendencia hace 250 millones de años.

Un segundo grupo es el de los xenacántidos, primos lejanos de los tiburones primitivos. Durante el Carbonífero superior y el Pérmico inferior, estos depredadores de agua dulce medraban en los pantanos carbonosos. Los xenacántidos fueron los gigantes de aquella época, llegando a alcanzar hasta tres metros de longitud, si bien los ejemplares hallados en Montceau son bastante menores y ninguno de ellos supera el metro de longitud. Sus dientes, numerosos y robustos, denuncian un comportamiento cazador. Además, poseían una fuerte espina dentada en la base del cráneo que les servía, a buen seguro, de arma defensiva.

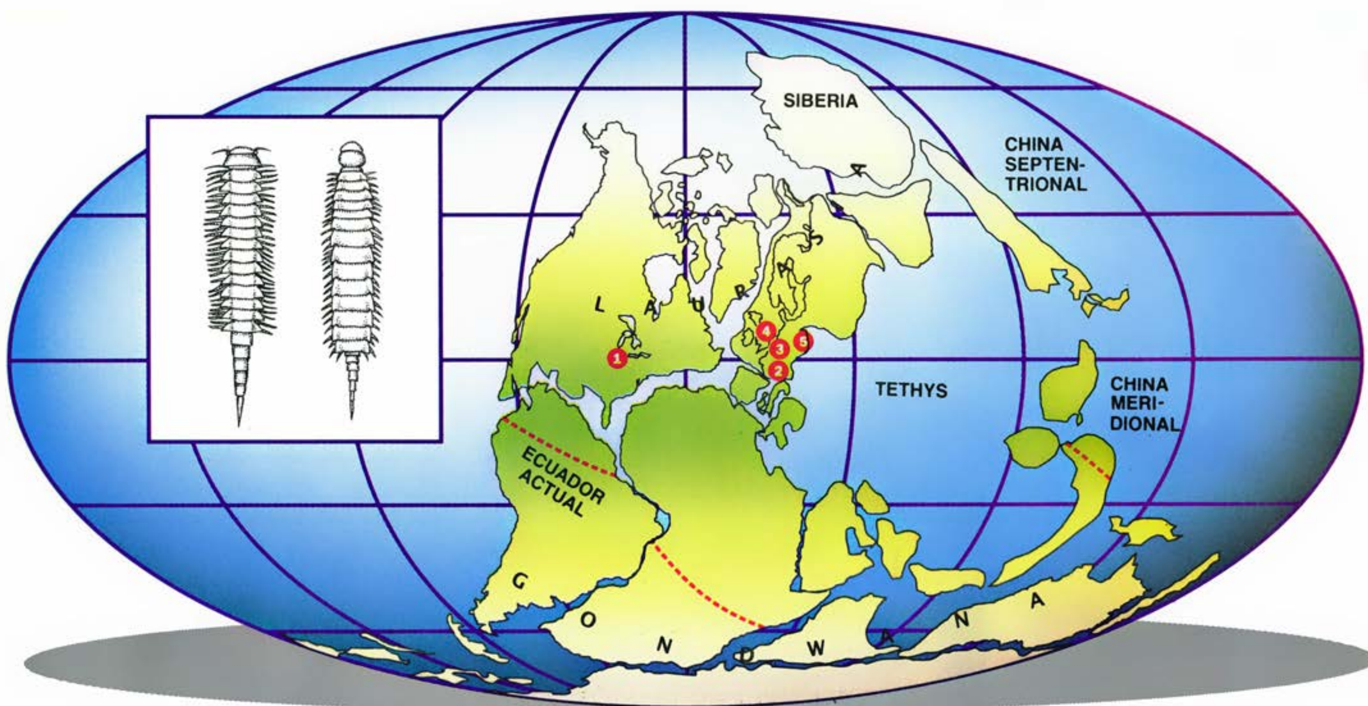
Un tercer grupo, los actinopterigios, está representado en Montceau por ocho especies. Por su apariencia, recuerdan a sus descendientes actuales, las carpas, sardinas y atunes entre otros; poseen, sin embargo, bastantes caracteres primitivos: su anatomía craneana o sus gruesas escamas, casi de esmalte, que debieron conferir a estos peces una apariencia bastante rígida.

Los anfibios de Montceau semejan salamandras enanas. En cierta zona del depósito se halló un grupo fosilizado de larvas con branquias, similares a los renacuajos de los anfibios actuales. En otras zonas de Montceau se recuperaron fragmentos de esqueletos mayores pertenecientes, con toda probabilidad, a animales adultos similares a los identificados en otros depósitos contemporáneos. Fuera de ello, quedan allí pocos huesos de anfibios o reptiles.

Pero sí dejaron numerosas huellas que se han conservado en las pizarras: Estas huellas definen las antiguas riberas: márgenes de ríos y orillas de lagos y lagunas. A diferencia de los cadáveres, que pueden ser arrastrados lejos de su lugar de origen, las impresiones permanecen en el mismo lugar desde el día en que se plasmaron. Muestran dedos, garras y líneas sinuosas dibujadas por un animal que se dirige al agua y arrastra su cola por el fango. Las huellas de tetrápodos de Montceau revelan que allí convivieron varias especies de anfibios y reptiles. Sin embargo, el número de impresiones no proporciona ninguna información acerca de la abundancia de individuos pertenecientes a una especie, ya que un mismo organismo puede dejar varias trazas en el transcurso de un día.

Los animales no fueron los únicos artífices de las impresiones fósiles. Nuestro equipo encontró también huellas de gotas de lluvia, marcas onduladas dejadas por corrientes de agua y las características grietas abiertas por la desecación de la arcilla. Estas impresiones son importantes indicadores climáticos y han revelado intervalos de aridez que se alternaron con otros de precipitaciones. Este tipo de registros recoge, además, cambios a escalas temporales brevísimas, de una estación, una semana o, incluso, un día.

¿En qué tipo de ambiente se desenvolvieron las plantas y los animales de Montceau? Los testimonios faunísticos dan fe de un cuadro contradictorio. Los gusanos poliquetos y parte de los artrópodos acuáticos, por citar dos ejemplos, vivieron, como sus descendientes actuales, en aguas saladas. Además se han recuperado fósiles parecidos a los de Montceau en Mazon Creek, cuyos sedimentos son de origen marino. Pero otros animales acuáticos son característicos de ambientes lacustres, generalmente de agua dulce. Así, los onicóforos se encuentran hoy en bosques tropicales húmedos, cerca de los ríos; los anfibios existentes hoy viven exclusivamente en aguas dulces. Se han descubierto fósiles de artropléuridos y de *Estheria* en las cuencas carboníferas de agua dulce de Europa y Norteamérica. Por último, no hay duda



7. DURANTE EL CARBONIFERO SUPERIOR, las masas continentales, que se encontraban situadas muy al sur de sus posiciones actuales, se congregaban en dos protocontinentes: Laurasia (que más tarde se dividió en América del Norte, Europa y gran parte de Asia) y Gondwana (Africa, Antártida, Australia, India y Sudamérica). En aquella época, Mazon Creek (*1*), Montceau-les-Mines (*2*), la cuenca del Sarre (*3*), Gran Bretaña (*4*) y Bohemia (*5*) —yacimientos de fósiles en la actualidad— caían próximos al ecuador. Mazon Creek estaba más cerca de Europa que hoy, lo que explica el parecido de su fauna con las halladas en Europa. El descubrimiento en Montceau de un nuevo euticarcinoide, *Sottyxerxes multiplex* (*izquierda*), obligó a los especialistas a reexaminar los fósiles de Mazon Creek y reconocer allí la presencia de *Sottyxerxes piekoae* (*derecha*), una especie relacionada con la de Montceau. El mapa muestra a China dividida en un bloque norte y otro sur; una teoría alternativa, recientemente expuesta por paleobotánicos, mantiene que ambos bloques se habían fusionado antes.

de que los miriápodos, arañas, escorpiones, insectos y reptiles son, en su mayoría, terrestres.

Esta confusa imagen del ambiente de Montceau se aclaró merced a la presencia de un humilde bivalvo del género *Anthraconaia*. En Montceau, este molusco fósil suele aparecer con sus dos valvas unidas por una charnela. La conservación de elemento tan frágil indica que las conchas de los organismos no sufrieron ningún transporte previo a su enterramiento. Cabe la posibilidad de que quedaran repentinamente sepultados bajo una deposición rápida de sedimentos. Además, el pequeño tamaño de los ejemplares junto con la morfología alargada de sus conchas nos remiten a ambientes con cierta pobreza en nutrientes orgánicos. Estos datos sobre la rapidez de la sedimentación y la pobreza nutritiva indican que Montceau estaba situado en un estuario, donde alternaban corrientes fluviales de agua dulce y mareas salobres.

Las faunas acuáticas han proporcionado algunos datos sobre la geografía general de aquella época. Los peces fósiles de Montceau muestran una estrecha relación con los peces hallados en las cuencas lacustres cercanas a la región del Macizo Central, a menos de 200 kilómetros de distancia. En aquella época, los lagos debieron de estar unidos, probablemente por avenidas, permitiendo a las especies acuáticas emigrar de un lugar a otro. Cuando las aguas de anegación se retiraban, los lagos volvían a quedar aislados. Estos episodios de poco alcance quizá no dejaron trazas visibles para un geólogo que trabaje 300 millones de años más tarde, pero los datos paleontológicos sugieren que debió existir algún tipo de conexión entre los diferentes puntos.

Si la región de Montceau se hallaba salpicada de lagos, ¿dónde estaba el mar? Los geólogos piensan, en su mayoría, que a finales del Carbonífero, el mar se encontraba bastante al sur de Montceau. ¿Cómo explicar entonces la presencia de animales marinos en Montceau y en el resto del Macizo Central? Una posible respuesta es que los lagos de agua salada fueran restos de los mares epicontinentales que inundaron la región antes del descenso del nivel del mar.

Los fósiles de Montceau muestran pruebas claras de un notable cambio climático acontecido en el lapso de tiempo en que mediaron. De su comparación con yacimientos contemporáneos de otras partes del mundo se infiere que no se trató de un fenómeno local o regional. Los datos fósiles de Mazon Creek vienen a contarnos los mismos pasos. En este depósito se ha conservado un ambiente estuarino similar al de Montceau y contiene afloramientos datados desde el Westfaliense (ligeramente más antiguos que las primeras capas de Montceau) hasta el Pérmico inferior. Otros fósiles, procedentes de puntos similares de Gran Bretaña, Bohemia y la cuenca alemana del Sarre, apoyan ese marco de cambio climático.

¿Por qué localidades tan alejadas entre sí comparten fósiles similares? La respuesta se torna evidente en cuanto situamos esos puntos en un mapa paleogeográfico que muestre la posición de los continentes en las postrimerías del Carbonífero. En aquel tiempo, Europa, América del Norte y gran parte de Asia constituían una sola masa continental: Laurasia. El estrecho mar de Tethys separaba Laurasia de Gondwana, un vasto protocontinente formado por los continentes que, posteriormente, se situarían en el hemisferio sur. El océano Atlántico no existía; por ello, Mazon Creek se hallaba más próximo a Europa que en la actualidad. Además, las localidades citadas se encontraban cerca del ecuador.

Estos factores justifican la semejanza climática de sus faunas.

Desde entonces, Laurasia y Gondwana han derivado de forma independiente, partiéndose hasta configurar los continentes actuales. Europa y América del Norte han quedado separadas por el océano Atlántico; y, lo que es más importante, los continentes (a excepción de Australia y la Antártida que se deslizaron hacia el sur) emigraron hacia el norte. En consecuencia, el ecuador ya no estaba en Laurasia, sino en Gondwana; durante el Pérmico, se situaba ya al sur de Mazon Creek, el Macizo Central, la cuenca del Sarre y Bohemia. Esa es la historia geológica que explica la evolución climática sugerida por los datos de Montceau.

Junto con Mazon Creek y la región de Bohemia, Montceau se ha convertido ya en zona de referencia para conocer la paleontología de Laurasia en el límite permocarbonífero; pero queda mucho camino por recorrer. El desván del Museo de Historia Natural de Autun está repleto de cajas atiborradas por miles de nódulos sin abrir. El estudio de este material proporcionará una imagen más precisa de las condiciones locales de la vida y la sedimentación fósil; asimismo, ayudará a desentrañar los pormenores anatómicos que reflejen la evolución de varias especies, información que nos es muy necesaria para este período de la historia de la Tierra. Los investigadores podrían encontrar organismos ya conocidos en otros lugares, pero ignorados en Montceau, lo que enriquecería el panorama paleogeográfico. Cada descubrimiento añadirá una pieza más al cuadro de la evolución de la vida sobre nuestro planeta.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

VERTEBRATE PALEONTOLOGY. Alfred Sherwood Romer. The University of Chicago Press, 1971.

PRÉCAMBRIEN-ÈRE PALÉOZOÏQUE. Charles Pomerol y Claude Babin. Doin Editeurs, 1977.

SUR *BOURBONNELLA SOTTYI*, UN NOUVEL AEDUELLIDAE (POISSON ACTINOPTÉRYGIEN). STÉPHANIEN DU BASSIN DE BLANZY-MONTCEAU. Daniel Heyler en *Compte rendu sommaire de la Societé géologique de France,* Bulletin Supplement vol. 19, n.º 1, págs. 21-23; 1977.

MAZON CREEK FOSSILS. Matthew H. Nitecki. Academic Press, 1979.

ACTINOPTÉRYGIENS DU STÉPHANIEN DE MONTCEAU-LES-MINES (SAÔNE-ET-LOIRE, FRANCE). Daniel Heyler y Cécile Poplin en *Palæovertebrata*, vol. 13, n.º 3, págs. 33-50; septiembre de 1983.

Revestimientos pulverizados con plasma

La llama caliente y de alta velocidad de un cañón de plasma funde casi todos los materiales cerámicos o metálicos y los pulveriza para formar un revestimiento de protección contra la corrosión, el desgaste o las altas temperaturas

Herbert Herman

En el año 1970, el trabajo de un estudiante que el autor estaba supervisando tuvo un accidente afortunado. Mi alumno debía investigar las propiedades del óxido de aluminio, un material cerámico refractario (resistente al calor) que había fundido y posteriormente había solidificado con rapidez. Este trabajo presentaba una doble dificultad: calentar la substancia en cuestión hasta temperaturas muy por encima de su punto de fusión, cercano a los 2000 grados Celsius, y enfriarla luego con rapidez. Como fuente de calor utilizaba un cañón de plasma, un dispositivo inventado en la década de 1950 y usado en la industria para fundir y formar depósitos de materiales cerámicos y metales. Para solidificar rápidamente el óxido de aluminio, mi alumno se aprestaba a pulverizar el material fundido sobre un substrato frío.

El procedimiento resultó válido en todos los sentidos, salvo en uno. Al introducir el óxido de aluminio en polvo en la llama muy caliente y de alta velocidad del cañón de plasma, dicho material se fundía y se proyectaba sobre un blanco de acero rugoso, dispuesto para retener el depósito conforme se iba acumulando en él. Allí se producía un enfriamiento inmediato y se formaba un revestimiento sólido. Pero por aquel entonces nos interesaba desentrañar las propiedades del material cerámico aisladamente, es decir, sin la presencia de ningún substrato, y la capa de material cerámico obtenida en este proceso no se podía desprender, ni siquiera con la ayuda de un escoplo. Habíamos tropezado así con los revestimientos pulverizados con plasma, una técnica ya conocida, aunque apenas desarrollada.

Desde aquella fecha, en mi laboratorio y en otros muchos se ha venido estudiando intensamente esta técnica. Con mis colaboradores estoy preparando revestimientos pulverizados con plasma de materiales cerámicos, metales e incluso polímeros; lo hacemos en el aire, en el vacío e incluso bajo el agua, utilizando cañones manuales y cañones montados en brazos de robots sometidos a control electrónico. La actividad de nuestro laboratorio refleja la amplia variedad de aplicaciones industriales que han surgido durante estos años. En los motores de las aeronaves, los revestimientos pulverizados con plasma protegen las hélices de las turbinas de los ambientes altamente corrosivos en que trabajan; los materiales cerámicos pulverizados con plasma aíslan a otras partes de los motores de las temperaturas elevadas. Los revestimientos pulverizados con plasma se encuentran también en los motores de combustión interna, en las centrales de energía eléctrica, en las máquinas industriales y en otros muchos campos donde la tecnología plantea condiciones extremas para los materiales utilizados. A medida que aumenta la demanda y lo hace el conocimiento teórico y práctico del proceso de pulverización con plasma, se dilata el ámbito de posibles aplicaciones.

La pulverización con plasma no es ni mucho menos el único método que hay para obtener un revestimiento de protección. Las opciones alternativas varían desde procedimientos sencillos (galvanización) hasta técnicas refinadísimas (deposición de un vapor, en la que el material empleado en el revestimiento se vaporiza y se hace condensar sobre un sustrato, átomo a átomo). Sin embargo, la técnica de pulverización con plasma se puede utilizar con una amplia variedad de materiales, incluidos los cerámicos refractarios, y con un elevado rendimiento (en algunos casos, por encima de los 20 kilogramos por hora). Esta técnica presenta también un riesgo mucho menor de que se degraden el revestimiento y el substrato, en comparación con muchos otros procesos a altas temperaturas; en efecto, el gas que forma la llama de los plasmas es químicamente inerte y el blanco se puede mantener bastante frío. Por otra parte, el uso de un cañón de plasma sólo resulta un poco más engorroso que el de un simple pulverizador de pintura.

Aunque la técnica de pulverización con plasma ha evolucionado en muchos aspectos desde 1970, el diseño básico de un cañón de plasma apenas ha cambiado. Este dispositivo consta de dos electrodos: un cátodo en forma de cono, situado en el interior de un ánodo cilíndrico, que se extiende más allá del cátodo y forma una boquilla. Un gas inerte –generalmente argón mezclado con hidrógeno– fluye a través del espacio comprendido entre los electrodos, donde se ioniza y origina un plasma. A través de un tubo, llega el

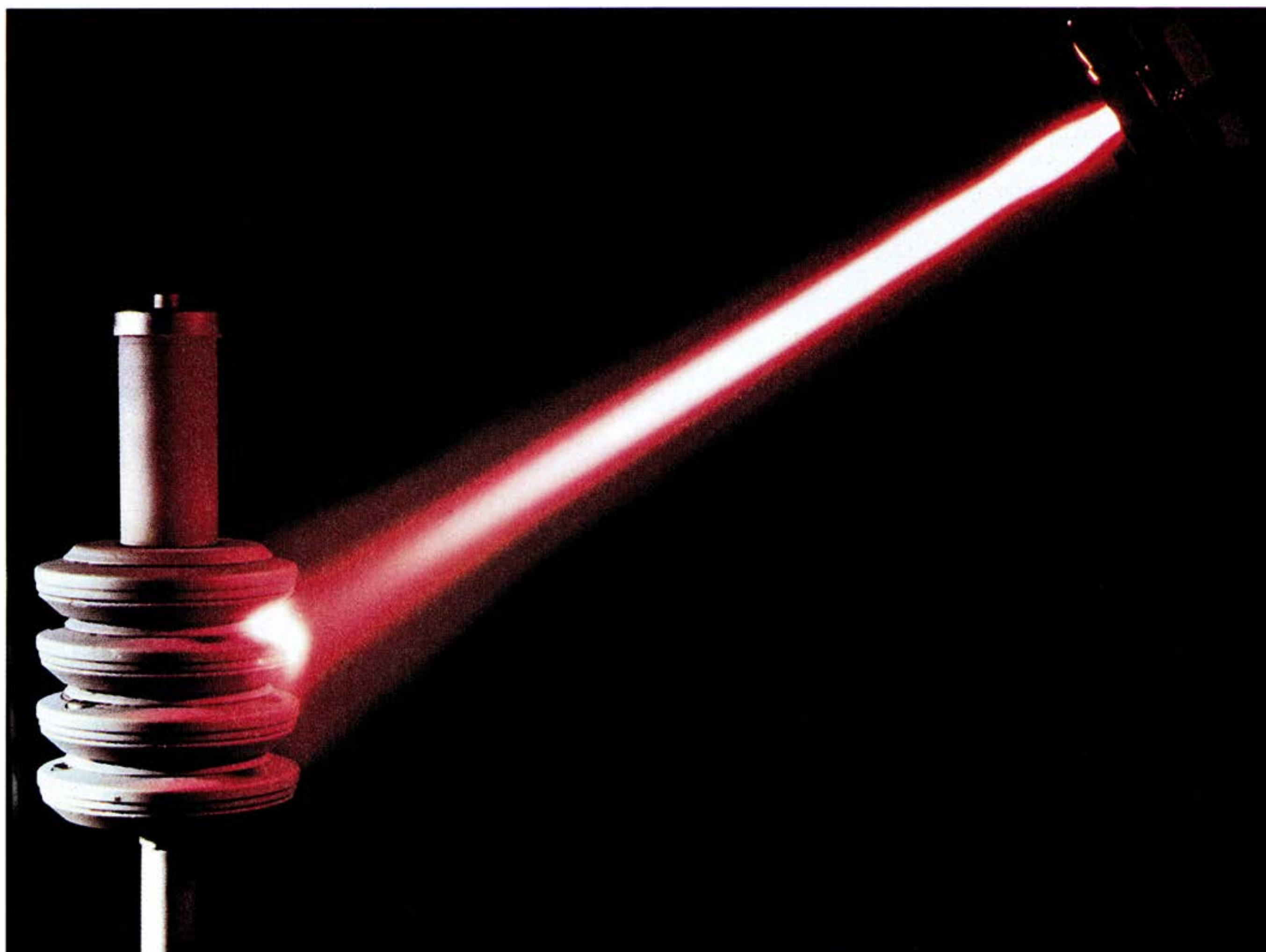
HERBERT HERMAN es profesor de ciencias de los materiales en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Herman defendió su tesis doctoral en la Universidad del Noroeste en 1961; más tarde llevó a cabo trabajos complementarios en la Universidad de París (Orsay), becado por la fundación Fulbright, y en el Laboratorio Nacional de Argonne. Dejó temporalmente la Universidad de Pennsylvania y Stony Brook para impartir clases de industria en la empresa Western Electric y asesorar a la Oficina de Investigación Naval de Londres. Es director editorial de la revista *Materials Science and Engineering* y presidente de la división de pulverización térmica de la ASM.

material de revestimiento polverulento hasta el chorro de plasma que se forma en la boquilla anterior. Se hace circular una corriente de agua por unos conductos situados en el ánodo y el cátodo; se impide así que el fuerte calor generado en ellos produzca su fusión.

El cañón empieza a operar cuando un impulso de corriente crea un arco, un canal conductor eléctrico en el gas, en el espacio comprendido entre los dos electrodos. Una corriente estacionaria de muchos centenares de ampère, a un potencial del orden de 50 volt, mantiene el arco. Cundo se forma éste, se liberan electrones de los átomos del gas; los electrones y los iones positivos que se crean en el proceso se aceleran respectivamente hacia el ánodo y el cátodo. Estas partículas avanzan a velocidades muy elevadas y colisionan con otros átomos y moléculas neutras del gas, disociando las moléculas en sus átomos constituyentes e ionizandolos. De este modo, el gas que existe en el interior del arco se transforma en un conjunto de iones y electrones muy energéticos, es decir, en un plasma. La corriente de gas que fluye entre los electrodos ensancha el arco, de suerte que, en su recorrido desde un electrodo al otro, el arco alcanza la boquilla del cañón y forma allí una llama de plasma.

La mayor parte de la potencia que consume el cañón −cifrada entre 20.000 y 80.000 watt− va a parar inicialmente a los electrones libres del plasma, y no a los iones positivos. En los plasmas tenues, tales como los que existen en un anuncio luminoso de neón, se registran muy pocas colisiones entre los electrones de alta energía y los iones positivos más lentos; por consiguiente, la energía transferida de unos a otros es muy pequeña. Los iones positivos se siguen moviendo lentamente; aunque el plasma contenga una gran cantidad de energía, permanece frío. Sin embargo, la densidad del plasma en un cañón multiplica por mil la densidad del plasma a baja presión de un tubo de neón. Las colisiones frecuentes transfieren energía desde los electrones hacia los iones positivos, acelerándolos hasta que el plasma alcanza una suerte de equilibrio. El resultado es un plasma térmico, en el que la energía de los electrones se ha convertido en entalpía o contenido calórico. Una entalpía elevada implica una temperatura alta; en un cañón de plasma, la temperatura puede alcanzar los 15.000 grados centígrados.

Además de la entalpía que se refleja en una alta tamperatura, el plasma contiene entalpía asociada con la ionización de los átomos del gas y, en un primer paso necesario en muchos gases, con la disociación de las moléculas en sus átomos constituyentes. Un plasma de hidrógeno, cuyas moléculas deben



1. LA LLAMA DE PLASMA recubre unos discos de cobre con tungsteno para obtener, de este modo, "blancos" de un generador de rayos X, capaces de producir dicha radiación al ser bombardeados con electrones. Un arco eléctrico alojado en el cañón de plasma origina la llama al ionizar gas argón, convirtiéndolo en plasma. El polvo de tungsteno se inyecta sobre la llama en la boquilla del cañón, un lugar donde los iones y electrones que constituyen el plasma están desarrollando un proceso de recombinación. La llama, que alcanza una temperatura del orden de 15.000 grados Celsius, produce la fusión de las partículas y las proyecta sobre el blanco. La pulverización se desarrolla en una atmósfera a baja presión y libre de oxígeno, que evite el deterioro de los metales.

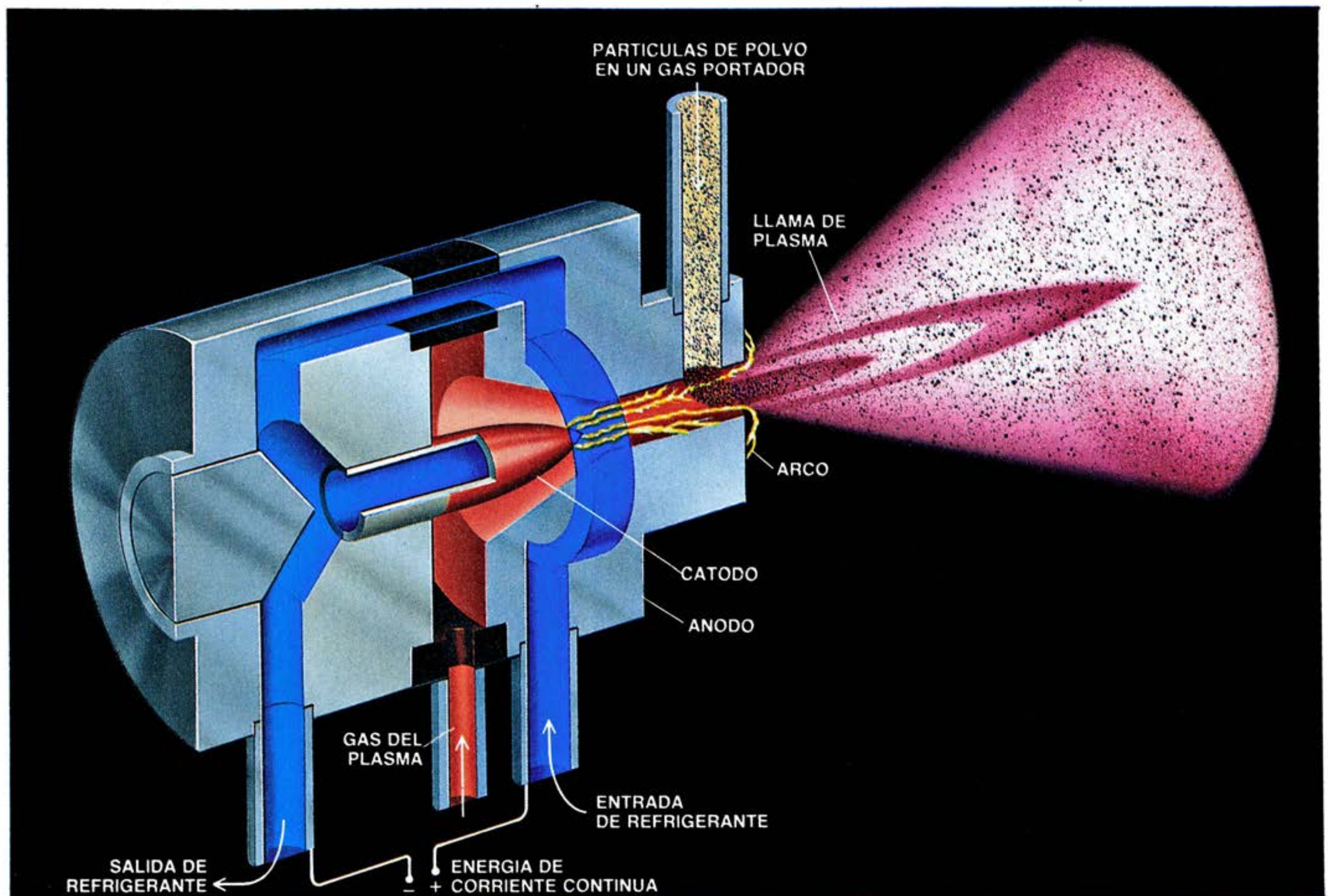
disociarse en los dos átomos que las forman antes de que puedan ionizarse, manifiesta, a determinada temperatura, mayor entalpía que un plasma de argón, cuyos átomos son independientes entre sí. En consecuencia, cuando en un cañón de plasma se añade hidrógeno al argón, el contenido térmico de la llama crece, y por consiguiente aumentan la potencia del cañón y su capacidad de fundir materiales refractarios.

La elevada temperatura del plasma origina una presión elevada, a la que se añaden dos efectos relacionados con la conductividad eléctrica del plasma. En la proximidad de las paredes del ánodo refrigeradas con agua, el plasma cede su lugar a un gas más frío; este gas no está ionizado y, por tanto, no es conductor. Esta capa no conductora estrecha el canal del plasma y da lugar a que las líneas del campo eléctrico que atraviesan el plasma de un electrodo a otro se dirijan hacia el centro del orificio. Junto a este efecto pinza térmico se produce también un efecto pinza magnético. El campo eléctrico que alinea el chorro de plasma está acompañado por un campo magnético que rodea y comprime dicho chorro. La acción conjunta de ambos efectos pinza incrementa la presión, la temperatura y la velocidad del plasma. Dependiendo de la geometría y la potencia del cañón y del flujo de gas, la llama del plasma llega a alcanzar velocidades supersónicas.

El material de revestimiento en polvo, transportado por una corriente de un gas tal como el argón, se inyecta en esta llama, bien en la boquilla, bien cuando emerge por la cara exterior del ánodo. Lo que sucede a continuación, siempre que las condiciones sean las adecuadas, es muy simple en líneas generales. La llama acelera las partículas, que se funden debido a su elevada temperatura, probablemente aumentada por el calor liberado cuando, sobre la superficie de las partículas del material utilizado, los iones se recombinan y las moléculas se reasocian. Las gotitas de material fundido salen desprendidas hacia la superficie del blanco; allí se solidifican y acumulan, hasta formar un revestimiento protector grueso y muy compacto.

Sin embargo, para que este proceso tenga éxito, debe cumplirse una serie de condiciones muy restrictivas. Las partículas absorberán una cantidad de calor suficiente en la parte más caliente de la llama —cerca de la superficie del ánodo—, para que se fundan completamente, pero no tanto como para producir un sobrecalentamiento y la subsiguiente vaporización. Al mismo tiempo, las gotitas no deben demorarse excesivamente en la llama, sino que se moverán con la agilidad suficiente para dispersarse adecuadamente cuando colisionan con el blanco, rellenando las grietas y recubriendo toda la superficie de forma homogénea.

El calentamiento y aceleración de las partículas dependen de una amplia gama de variables. El contenido térmico y la velocidad de la llama de plasma desempeñan un papel crítico; estos valores caracterizan la geometría del cañón, su potencia y la composición y flujo de salida del plasma gaseoso. La eficacia de la fusión y la aceleración del



2. ESTE CAÑON DE PLASMA ionizа una corriente de gas e inyecta en la llama resultante el material de revestimiento en polvo. Un gas inerte (*rojo*), constituido fundamentalmente por argón, fluye a través del espacio comprendido entre un cátodo cónico y un ánodo anular. En esta zona, el gas resulta ionizado por un arco mantenido por una corriente continua muy intensa. El plasma resultante emerge a través de una boquilla y arrastra el material en polvo que se introduce en el dispositivo mediante un gas portador (*marrón*). A través del cañón circula una corriente de refrigeración de agua (*azul*) para impedir así su fusión.

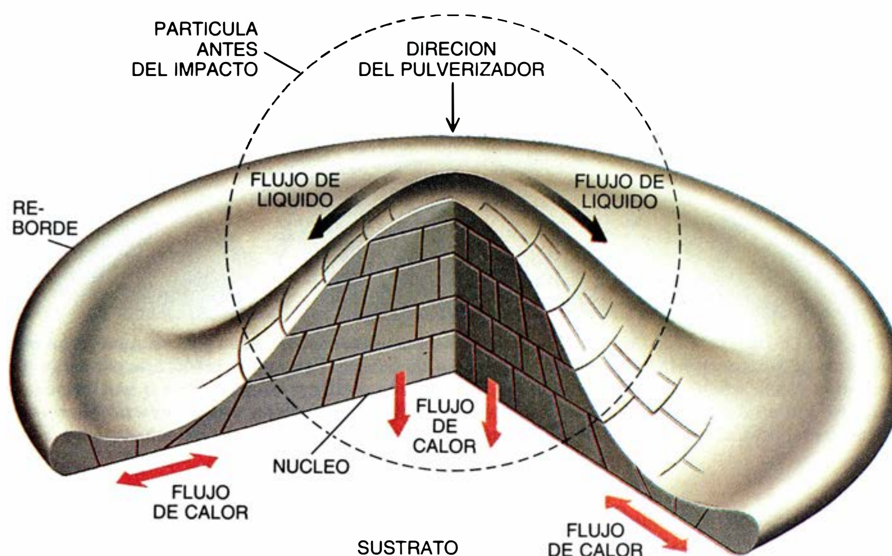
polvo depende de la naturaleza del material de revestimiento y del tamaño y forma de sus partículas. Para cada material de revestimiento y para un cañón determinado, existe un tamaño de las partículas óptimo. Las partículas cuyo tamaño sea inferior al ideal se sobrecalentarán y vaporizarán; las partículas mucho mayores no se fundirán y pueden separarse de la llama o rebotar en el blanco, sin adherirse a él.

La forma en que las partículas se introducen en la llama condiciona su fusión y deposición. La presión del gas portador debe ajustarse adecuadamente con el fin de que las partículas lleguen a la llama, pero no la atraviesen. El ángulo de inyección resulta, asimismo, decisivo: la inyección en la dirección del viento obvía la disrupción de la llama por el influjo de las partículas y aumenta su velocidad, en tanto que la inyección ascendente proporciona al polvo un tiempo de calentamiento mayor en la llama.

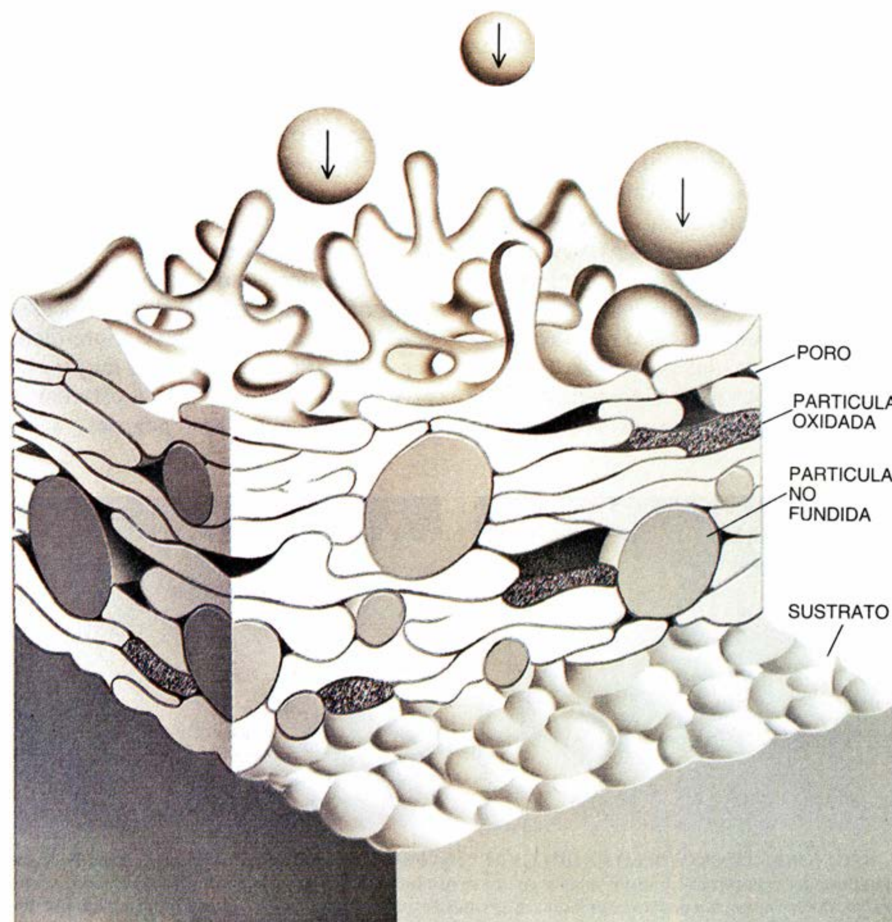
Si la pulverización se hace en el aire, las partículas empiezan a enfriarse y decelerarse cuando colisionan con las moléculas de aquél, una vez han abandonado la llama del plasma. En consecuencia, un factor adicional a considerar en los procesos de revestimiento será la distancia entre el cañón y la superficie a revestir, distancia que suele variar entre los 5 y 10 centímetros cuando la pulverización se realiza en el aire.

Hasta fechas recientes, la manipulación de todas estas variables —y otras muchas— para producir un revestimiento de alta calidad era, a lo sumo, una cuestión de intuición informada. Hoy, y al hilo del esfuerzo empeñado en desarrollar los fundamentos teóricos del diseño de los sistemas de pulverización con plasma, se están llevando a cabo en muchos laboratorios estudios básicos sobre la interacción entre las partículas y la llama de un plasma. Pierre Fauchais y sus colaboradores, de la Universidad de Limoges, han estudiado detenidamente la velocidad del gas y de las partículas en el chorro. Estas y otras investigaciones se basan en las técnicas del efecto Doppler en láseres; en ellas, el desplazamiento de la frecuencia que se produce en la luz de un láser reflejada por las partículas en movimiento nos da un índice de su velocidad.

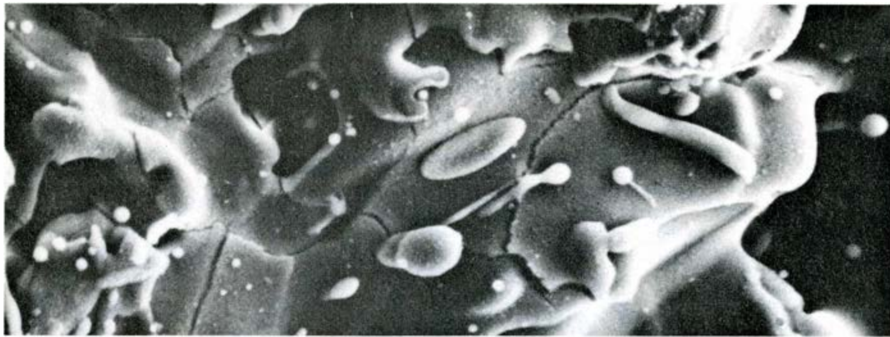
Con el fin de estudiar la velocidad del propio gas, el grupo de Limoges "sembró" la llama con partículas muy pequeñas de óxido de aluminio, cuyo



3. ESTE "PEGOTE" se produce cuando una gotita microscópica de material de revestimiento fundido choca contra una superficie, sobre la que se aplasta y solidifica. El autor y sus colaboradores estudiaron estos pegotes, o "grumos", mediante un microscopio electrónico de transmisión. Analizando la forma y la orientación de los granos cristalinos internos, llegaron a la conclusión de que, cuando uno de estos pegotes se solidifica, el calor se pierde hacia el substrato empezando por el centro, es decir, por la parte de la gotita que choca primero con la superficie del sustrato, formándose así un núcleo solidificado. El resto del material fundido se esparce a partir del mismo, creando una protuberancia durante el proceso de endurecimiento.



4. FORMACION DE UN REVESTIMIENTO por pulverización con plasma. Se trata de un proceso caótico. Las partículas fundidas se dispersan y aplastan sobre el blanco cuando chocan contra él, recubriendo en primer lugar las rugosidades de su superficie y uniéndose más tarde unas con otras. Cuando el depósito atrapa aire, se forman poros. En algunos casos, las partículas se calientan excesivamente en la llama y se oxidan; en otros casos, partículas no se funden, sino que permanecen ocluidas en el depósito.



5. REVESTIMIENTO CERAMICO de un óxido de aluminio pulverizado con un plasma. Aparece aumentado unas 2500 veces en esta fotografía de microscopio electrónico. Los pegotes producidos por las gotitas incidentes se han solidificado sobre la superficie, que se ve cruzada por las grietas que se han formado al enfriarse y contraerse el revestimiento. Estas irregularidades preexistentes pueden reforzar los revestimientos cerámicos, al impedir el crecimiento de otras grietas cuando estos materiales se someten a tensiones.

diámetro era de tres micrometros (millonésimas de metro). Estas partículas se aceleran, cabe presumirlo, con suma rapidez y su efecto sobre el flujo del gas es mínimo; sirven, pues, de trazadores del comportamiento del gas. Observando la llama "sembrada" con la ayuda de un láser, los investigadores encontraron que la llama en cuestión salía del cañón con una velocidad del orden de 600 metros por segundo (valor que casi doblaba la velocidad del sonido) y que dicha velocidad disminuía de forma continua al alejarse del mismo.

A este grupo debemos el estudio del comportamiento de las partículas con un tamaño comprendido entre los 18 y 46 micrometros, unos valores típicos en muchos materiales de revestimiento. Observaron ellos que las partículas mayores respondían más lentamente al gas de aceleración y que las velocidades máximas alcanzadas eran menores. Por otro lado, todas las partículas, una vez aceleradas, perdían velocidad más lentamente que el propio gas. A unos siete centímetros de la boquilla del cañón, las partículas de 18 micrometros conseguían una velocidad máxima de 260 metros por segundo; a quince centímetros, su velocidad superaba todavía los 200 metros por segundo.

Cuando las rápidas gotitas del material de revestimiento llegan al blanco, colisionan contra una superficie que, por lo común, se ha sometido ya a un proceso mecánico hasta convertirla en rugosa (por ejemplo, utilizando abrasivos). En un principio, las gotitas se solidifican en los recovecos microscópicos de esta superficie rugosa, recubriendo sus irregularidades. Las partículas continúan llegando, quizás a un ritmo de un millón por segundo, acumulándose sobre el revestimiento en una cuantía que depende de la superficie a revestir y de la velocidad con que el cañón se mueve sobre dicha superficie. Para comprender mejor este proceso, se ha procedido a estudiar al microscopio tanto los "pegotes" aislados –es decir, los cuerpos que se forman cada vez que una gotita se solidifica sobre una superficie– como los revestimientos ya completos. La observación de la estructura interna de las partículas y los revestimientos se llevó a cabo con la ayuda de un microscopio electrónico de transmisión; la microscopía electrónica reveló las formas y las texturas de ambos elementos.

Las microfotografías electrónicas de los "grumos" o "pegotes" demostraron que su estructura interna –un mosaico de granos cristalinos– presenta muchas imperfecciones, sugiriendo así que cada partícula se solidifica muy rápidamente, quizás en una millonésima de segundo. Observando la orientación de los granos y la forma general de dichos pegotes, hemos entendido así el proceso: cuando la gotita incidente se aplasta sobre la superficie del substrato, éste actúa como un sumidero de calor; un frente de solidificación se mueve entonces hacia la parte externa del pegote, formándose una especie de montículo de material solidificado, por el que fluye el resto del material, hasta que todo él se endurece creando una protuberancia característica.

El resultado de este proceso, repetido muchos millones de veces, es una capa de material cuyo espesor puede variar entre una decena de micrometros y varios centímetros, un depósito lo suficientemente grueso como para poder desprenderse del substrato y utilizarse como material de base. Pero si el substrato es rugoso, el revestimiento se le adhiere firmemente por medios mecánicos. La adherencia de los revestimientos pulverizados con plasma se consigue también mediante otros procesos que no se conocen del todo. Algunos revestimientos establecen enlaces químicos con sus sustratos; los revestimientos metálicos forman un enlace cuando el calor producido en la pulverización con plasma (la pieza base de trabajo puede alcanzar una temperatura de 200 grados centígrados, a menos que se enfríe utilizando corrientes de aire) posibilita la interdifusión entre los átomos del revestimiento y del substrato.

Las fuerzas que mantienen unidos los pegotes solidificados uno a uno en el revestimiento son objeto de intensa investigación. Evidentemente, los pegotes sucesivos se engarzan entre sí al menos de manera mecánica. En los revestimientos metálicos puede darse también un proceso de interdifusión y, en ciertos revestimientos cerámicos,





6. SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS REVESTIMIENTOS pulverizados con un plasma. Ponen de manifiesto las características de los medios en que se producen dichos revestimientos. Estas dos microfotografías ópticas muestran dos revestimientos diferentes de un mismo material, aumentados en unos 100 diámetros: una aleación de cobalto, cromo, aluminio e itrio, pulverizada sobre acero en el aire (*izquierda*) y en el vacío (*derecha*). El revestimiento pulverizado en el vacío (en realidad, una atmósfera a baja presión de un gas inerte) es mucho más densa y más homogénea que el revestimiento pulverizado en el aire, que contiene muchos poros y pegotes oxidados. En el vacío, las gotitas se mueven mucho más rápidamente y se dispersan con una mayor uniformidad cuando chocan contra la superficie; por otro lado, no existe aire que pueda quedar atrapado en el revestimiento o cuyos componentes puedan reaccionar con el material.

otro análogo a éste, el proceso de sinterización, puede unificar el depósito.

La observación de una microfotografía de la superficie de un depósito pulverizado con plasma, que se pretende constituya un revestimiento de alta calidad, puede resultar desalentadora. En particular, los revestimientos cerámicos muestran abundantes irregularidades. Estos revestimientos presentan numerosas grietas, formadas en el enfriamiento del material cerámico y muchas celdillas llenas con el aire atrapado durante el proceso de deposición. La existencia de grietas puede arruinar el comportamiento de un revestimiento sometido a tensiones mecánicas. Si las griestas se extienden por el revestimiento, minan su capacidad protectora contra la corrosión.

Curiosamente, la porosidad que caracteriza los revestimientos de material cerámico pulverizados con plasma es la base de una de sus aplicaciones más importantes: los revestimientos de barrera térmica, revestimientos aislantes que se emplean en las partes metálicas de las turbinas de gas y otros tipos de máquinas sometidas a temperaturas muy elevadas. En este sentido, la porosidad aumenta la capacidad aislante del material cerámico. Por otro lado, y dado el carácter quebradizo de los materiales cerámicos, la existencia de poros no debilita estos materiales, sino que los hace más resistentes, al impedir la propagación de grietas que se forman inevitablemente cuando estos materiales se someten a tensiones mecánicas. De ese modo, la existencia de poros proporciona a los revestimientos de barrera térmica la capacidad de resistir las tensiones mecánicas que se producen en las repetidas exposiciones a temperaturas muy elevadas en la sección de combustión de un motor.



7. CABEZA DE PISTON, representada en sección transversal. Se halla recubierta con un revestimiento cerámico de unos 2,5 milímetros de espesor pulverizado con plasma. Esta cerámica, una aleación de óxido de zirconio y óxido de itrio, constituye un revestimiento de barrera térmica: actúa, por tanto, como aislante, permitiendo elevar la temperatura a la que trabaja el motor y protegiendo al metal sobre el que está depositado. La elevación de la temperatura a la que trabaja un motor aumenta su rendimiento.

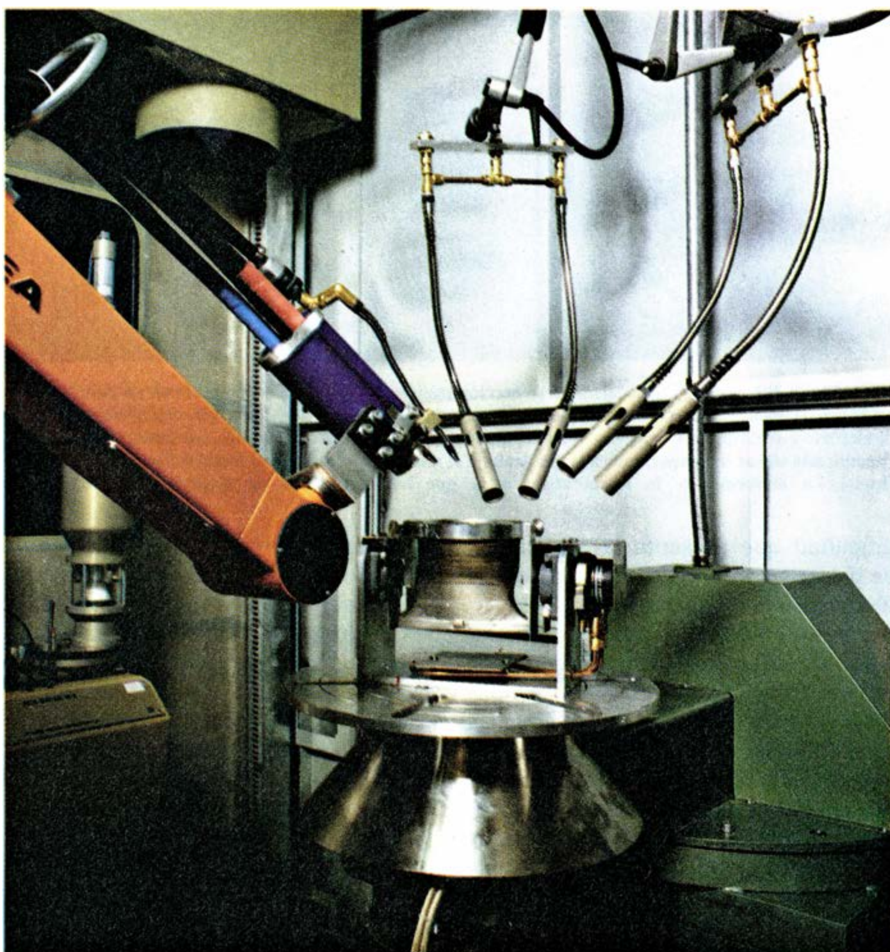
Propio de un revestimiento de barrera térmica es, en realidad, permitir que dichas temperaturas sean más elevadas incluso. El rendimiento de cualquier motor térmico aumenta a medida que lo hace su temperatura de combustión. Por ejemplo, los motores de turbina de los aviones funcionan ya a temperaturas próximas a los límites operacionales de las superaleaciones con las que están construidas las cámaras de combustión, las palas de las turbinas y otras partes del motor expuestas a temperaturas elevadas. Una forma de superar esta barrera aparente consiste en reemplazar las partes metálicas con materiales cerámicos refractarios, pero la fragilidad de éstos y la dificultad que presenta la fabricación de piezas cerámicas de alta calidad han bloqueado esta estrategia.

Por otra parte, actuando como aislante térmico, una capa de cerámica con un espesor de un cuarto de milímetro o más es capaz de proteger las partes metálicas de un motor cuando aumenta su temperatura operacional. Los revestimientos de barrera térmica, constituidos generalmente por óxidos de zirconio, se utilizan ya en las secciones de combustión de los motores de aviación, en las turbinas de gas marinas y en las grandes turbinas de gas incorporadas en los generadores de energía eléctrica. Los pistones, los cilindros y algunas secciones de los tubos de escape de los camiones de gran tonelaje, los barcos y las locomotoras se han revestido con materiales cerámicos pulverizados con plasma, para aumentar así su temperatura operacional y su rendimiento.

El funcionamiento de un motor significa el seguimiento de un ciclo repetido entre la temperatura ambiente y una temperatura de hasta 1000 grados centígrados quizá. Estas condiciones originan importantes tensiones en virtud de las drásticas diferencias existentes en la velocidad con que los materiales cerámicos y los metales de base se expanden o contraen con los cambios de temperatura. Gracias a la existencia de huecos que detienen las roturas, los revestimientos de barrera térmica pueden sobrevivir en estas condiciones. Por su capacidad para retener lubricantes, la presencia de poros resulta también beneficiosa en algunos revestimientos pulverizados con plasma que sirven de protección contra el desgaste, como sucede con las capas de óxido de titanio y aluminio que recubren muchos anillos de los pistones de los motores. Sin embargo, la existencia de poros puede resultar fatal en muchos revestimientos metálicos resistentes al desgaste, que desempeñan además un papel protector del substrato frente a la corrosión y la oxidación.

Se obtiene un revestimiento libre de poros mediante la pulverización del mismo en el interior de una cámara de la que se haya expulsado el aire y dejado sólo una atmósfera a baja presión del gas del plasma. Cuando se produce la pulverización del plasma en esta cámara "vacía", no puede quedar aire atrapado en el revestimiento y, por tanto, se elimina una de las fuentes de formación de poros. Por otro lado, las gotitas se mueven sin estar sometidas a la resistencia del aire y se depositan a velocidades mayores que las usuales; los depósitos que crean cuando colisionan con la superficie del substrato son más planos y más delgados. El proceso de pulverización en un vacío de plasma proporciona revestimientos más densos y libres de poros. Esta técnica permite también pulverizar con plasma metales tales como el zirconio, el titanio y el niobio, que se oxidarían si se calentaran en el aire, así como calentar ciertos substratos y revestimientos metálicos sensibles a la oxidación, con el fin de que se unan mediante un proceso de interdifusión.

La pulverización con plasma al vacío se utiliza ampliamente en la obtención de revestimientos metálicos delgados, con espesores del orden de 0,08 milimetros, que sirven para proteger las palas de las turbinas contra la oxidación. Estos revestimientos suelen estar constituidos por una aleación compleja de níquel, cobalto, cromo, aluminio e itrio; se emplea también como una primera capa en los componentes de muchos motores que se recubren más tarde con revestimientos de barrera tér-



8. BRAZO DE UN ROBOT ***(naranja)*****: sostiene un cañón de pulverización con plasma (*****azul*****) que le permite aplicar un revestimiento cerámico de barrera térmica a un componente de un motor de aviación; las cuatro boquillas plateadas dirigen unas corrientes de aire frío sobre el metal con el fin de impedir un sobrecalentamiento mientras dura el proceso. La pulverización con un plasma ha encontrado amplia aplicación en la industria aeronáutica. (Fotografía realizada en la empresa suiza Plasma-Technik Sulzers AG de Wohlen.**

mica. Cuando desempeñan este papel, dichos revestimientos se conocen con el nombre de revestimientos de unión; además de proteger los metales de la oxidación, son capaces de absorber parte de las tensiones que aparecen con los desajustes producidos a raíz de las diferencias entre las velocidades de expansión térmica de la pieza metálica y del revestimiento cerámico.

Al igual que sucede con cualquier otra técnica sencilla y versátil, la pulverización con plasma está dando lugar a múltiples variantes y refinamientos. El equipo utilizado en esta técnica constituye uno de los focos de desarrollo. Investigadores de Checoslovaquia han fabricado cañones de alta potencia (250 kilowatt), capaces de pulverizar material en grandes cantidades. La disposición especial de la boquilla permite su enfriamiento con una corriente de agua y produce una llama comprimida. La empresa Plasma Technik Sulzers AG de Wohlen, Suiza, ha desarrollado sistemas automatizados capaces de manejar el cañón y la pieza de trabajo para revestir las hojas de una turbina y otras formas complejas. Recientemente, la división Metco de la empresa Perkin-Elmer de Westbury, Nueva York, ha desarrollado un cañón provisto de cátodo móvil. Este dispositivo permite ajustar la potencia del cañón modificando las características del arco, en vez de añadir un segundo gas de plasma (hidrógeno, por ejemplo). Los fabricantes han desarrollado ciertos mecanismos capaces de alimentar un cañón con materiales en polvo diferentes y sustituir un polvo por otro a medida que avanza el proceso de pulverización y así lograr un revestimiento cuya composición y propiedades varíen a lo largo de su espesor. Algunos investigadores han experimentado incluso con un cañón de plasma de diseño radicalmente diferente, en el cual un campo eléctrico alterno de alta frecuencia, generado por una bobina de radiofrecuencia, reemplaza al arco como fuente del plasma. Los denominados plasmas de radiofrecuencia (RF) carecen de electrodos; se evita así la posibilidad de contaminar el revestimiento con material procedente de los mismos.

Los investigadores están también aplicando esta técnica a los nuevos materiales. La compañía General Electric recurre a la pulverización con plasma al vacío para fabricar componentes autosoportados: algunas partes delicadas de los motores de aviación se obtienen por pulverización con plasma de una superaleación sobre un sustrato que se puede eliminar más tarde. Otros investigadores han pulverizado simultáneamente partículas o fibras de un material cerámico y un polvo metálico; se crea así un material compuesto, rígido y duro, constituido por las partículas del material cerámico dispersas en una matriz metálica. En un programa conjunto llevado a cabo con un grupo de expertos del Laboratorio de Investigación Naval de los Estados Unidos y de la empresa Metco, el autor y sus colaboradores han fabricado una película gruesa de un material superconductor a altas temperaturas, pulverizando con plasma el compuesto en forma de polvo, procedimiento que podría desempeñar un papel importante en la fabricación de los futuros dispositivos superconductores.

Muchos investigadores de este dominio del saber prosiguen ahondando en los fenómenos básicos: la llama del plasma, el encuentro entre el plasma y el material de revestimiento en polvo, la deposición, la solidificación y estructuración del nuevo material, así como el comportamiento de los revestimientos en sus entornos previstos. Esperemos que una adecuada fundamentación teórica nos permita seguir creando revestimientos pulverizados con plasma que sean capaces de satisfacer las demandas más exigentes de la industria.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A QUARTER OF A CENTURY OF PLASMA SPRAYING. J. H. Zaat en *Annual Review of Materials Science*, vol. 13, págs. 9-42; 1983.

PLASMA METALLURGY: THE PRINCIPLES. V. Dembovsky. Elsevier North-Holland Publishing Co., 1985.

FUNDAMENTALS OF PLASMA CHEMISTRY & TECHNOLOGY. Herman V. Boenig. Technomic Publishing Co., 1988.

FUNDAMENTAL STUDIES ASSOCIATED WITH THE PLASMA SPRAY PROCESS. E. Pfender en *Surface & Coatings Technology*, vol. 34, n.º 1, págs. 1-14; enero de 1988.

El descubrimiento de la corteza visual

Entre quienes han contribuido a la identificación del centro visual del cerebro y a la descripción de su organización ocupan lugar destacado los soldados que sufrieron lesiones cefálicas durante la guerra ruso-japonesa

Mitchell Glickstein

Una persona con ojos sanos puede quedarse ciega si sufre una lesión en la parte dorsal del cerebro. La explicación es sencilla: los lóbulos posteriores (occipitales) de los dos hemisferios que forman el cerebro (la parte superior del encéfalo) constituyen un importante centro de la visión. Contienen lo que se conoce como corteza visual primaria. Si se destruye esa corteza, el cerebro es incapaz de detectar la inmensa mayoría de las señales visuales que transmiten los ojos.

La explicación quizá sea sencilla, pero ha resultado muy difícil descubrir que una porción de la corteza cerebral (la capa de materia gris que recubre el cerebro) está dedicada a la visión. En efecto, el proceso se ha prolongado durante más de un siglo. La historia que condujo a la identificación de la corteza visual primaria es fascinante, mezcla de ingenuidad, astuta observación, arrojo y fracaso. También es importante por sus consecuencias: nuestro mejor conocimiento sobre el funcionamiento del cerebro y la visión.

Cuando miramos un objeto, la luz que irradia genera una imagen reducida del mismo en la retina: el conjunto ordenado de fotorreceptores, y neuronas conectadas con ellos, del fondo del ojo. La retina traduce la imagen en impulsos nerviosos que el nervio óptico transmite hasta el cerebro [*véase la figura 2*]. Los objetivos iniciales de ese nervio son dos conjuntos de células nerviosas insertadas en el cerebro denominados cuerpos geniculados laterales. (Geniculado es un cultismo que significa "en forma de rodilla".) El nervio óptico transmite señales visuales del lado derecho del campo visual al cuerpo geniculado lateral del hemisferio izquierdo y del lado izquierdo del campo visual al hemisferio derecho.

Los cuerpos geniculados transmiten entonces las señales al lóbulo occipital del mismo lado del cerebro, en particular a la corteza visual primaria, que realiza un análisis inicial de la imagen y envía información seleccionada de ello a otras regiones del cerebro. Esas regiones analizan de nuevo la información con más detalle, la interpretan y la emplean para controlar los movimientos de los ojos o de las extremidades.

El camino que condujo al descubrimiento de la corteza visual primaria se inició a finales del siglo XVIII —unos 50 años antes de que se reconociera que la célula constituía la unidad estructural y funcional básica de plantas y animales y más de 100 años antes de que se describieran las propiedades características de las neuronas (los sillares estructurales del cerebro y de la médula espinal). Sin disponer de tales conocimientos sobre las células, los investigadores de finales del siglo XVIII tenían un vago concepto de cómo funcionaba el cerebro, pero progresaron bastante en la descripción de su morfología general.

En 1783, el anatomista escocés Alexander Monro II publicó un libro que mostraba con exactitud (y gran belleza) las subdivisiones principales del cerebro, incluidas la corteza gris y la materia blanca subyacente. Sin embargo, se describió la corteza como una capa gris uniforme, carente de subestructura. Hoy sabemos que la corteza está dividida en capas, cada una de las cuales difiere por el tipo de neuronas que contiene y el empaquetamiento de células y fibras nerviosas: los largos "axones" transportadores de señales que parten de los cuerpos celulares.

La imagen de una corteza sin estructura se apagó casi coincidiendo con la publicación del libro de Monro. Varios años antes de que apareciera la obra, Francesco Gennari, estudiante de medicina de la Universidad de Parma, emprendió un detallado estudio del cerebro. Gennari, que contaba sólo 24 años, endurecía los cerebros con hielo, examinaba su fisonomía superficial y a continuación cortaba y disecaba los especímenes, para describir las estructuras superficiales y las situadas a mayor profundidad. En 1782 publicó sus observaciones en la monografía *De peculiari structura cerebri*, impresa por el afamado editor y tipógrafo Giambattista Bodoni.

En la obra, que en su tiempo resultó algo confusa, Gennari indicaba que la corteza no era uniforme. Todo lo contrario; la sustancia gris se dividía por una capa blanquecina —una raya en los cortes transversales— que reseguía en paralelo la superficie del cerebro.

Le sorprendió el hallazgo; y así, es-

MITCHELL GLICKSTEIN, catedrático de neurología del University College de Londres, es asesor científico externo del Consejo británico de Investigaciones Médicas. En 1958 se recibió de doctor en psicología experimental por la Universidad de Chicago y antes de trasladarse a Londres ha pertenecido al Instituto de Tecnología de California, la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington y la Universidad Brown.

1. GUERRA RUSO-JAPONESA de 1904 y 1905 (ilustrada aquí en un grabado de madera de 1904), que contribuyó indirectamente al entendimiento de la visión humana. Durante esa guerra, Tatsuji Inouye, médico japonés, atendió a soldados nipones (*derecha*) que habían sufrido heridas de bala en la cabeza y correlacionó el lugar de la herida con las pérdidas de visión concomitante. Determinó así cómo se proyectaban las diversas partes del campo visual en el principal centro de visión cerebral: la corteza visual primaria. Inouye pudo realizar sus estudios porque los rusos habían introducido rifles de balas menores y más rápidas, que penetraban en el cráneo sin destrozarlo; gracias a ello, muchos soldados sobrevivieron a sus heridas y cooperaron con Inouye.

cribía: "Ninguno de los anatomistas cuyos textos he leído explica que, además de las sustancias cortical y medular, haya en el cerebro otra sustancia a la que estoy acostumbrado a llamar la tercera sustancia de ese órgano". (La materia "medular" es la materia blanca que subyace a la corteza y que, según se sabe ahora, consta fundamentalmente de fibras nerviosas envainadas en la sustancia blanquecina denominada mielina. La "tercera sustancia", la línea de Gennari, probablemente constaba también de axones mielinizados, los que transmiten señales en el lóbulo occipital.)

Además de descubrir la línea mielinizada que lleva su nombre, y de reconocer así la subdivisión de la materia gris, Gennari advirtió que el aspecto de la corteza difería de una parte a otra del cerebro. Descubrió que la línea blanca, que a veces aparece "como una única raya y otras veces [como] dos rayas paralelas independientes", se distingue con dificultad en los cortes de la parte anterior del cerebro, pero que "se detecta con claridad cada vez mayor en la parte posterior" (en la región que, según sabemos, constituye la corteza visual primaria). Una nota a pie de página indica que Gennari observó la línea que lleva su nombre el 2 de febrero de 1776.

De esta manera, trabajando con la más sencilla herramienta, mucho antes de que los nuevos métodos de tinción abrieran la vía al estudio microscópico del cerebro, Gennari inició el campo de la arquitectónica cerebral: el estudio de las diferencias regionales de la estructura cortical. Sin embargo, no era un personaje conocido y su intervención en el descubrimiento de la línea blanca cerebral no gozó del reconocimiento general hasta un siglo más tarde.

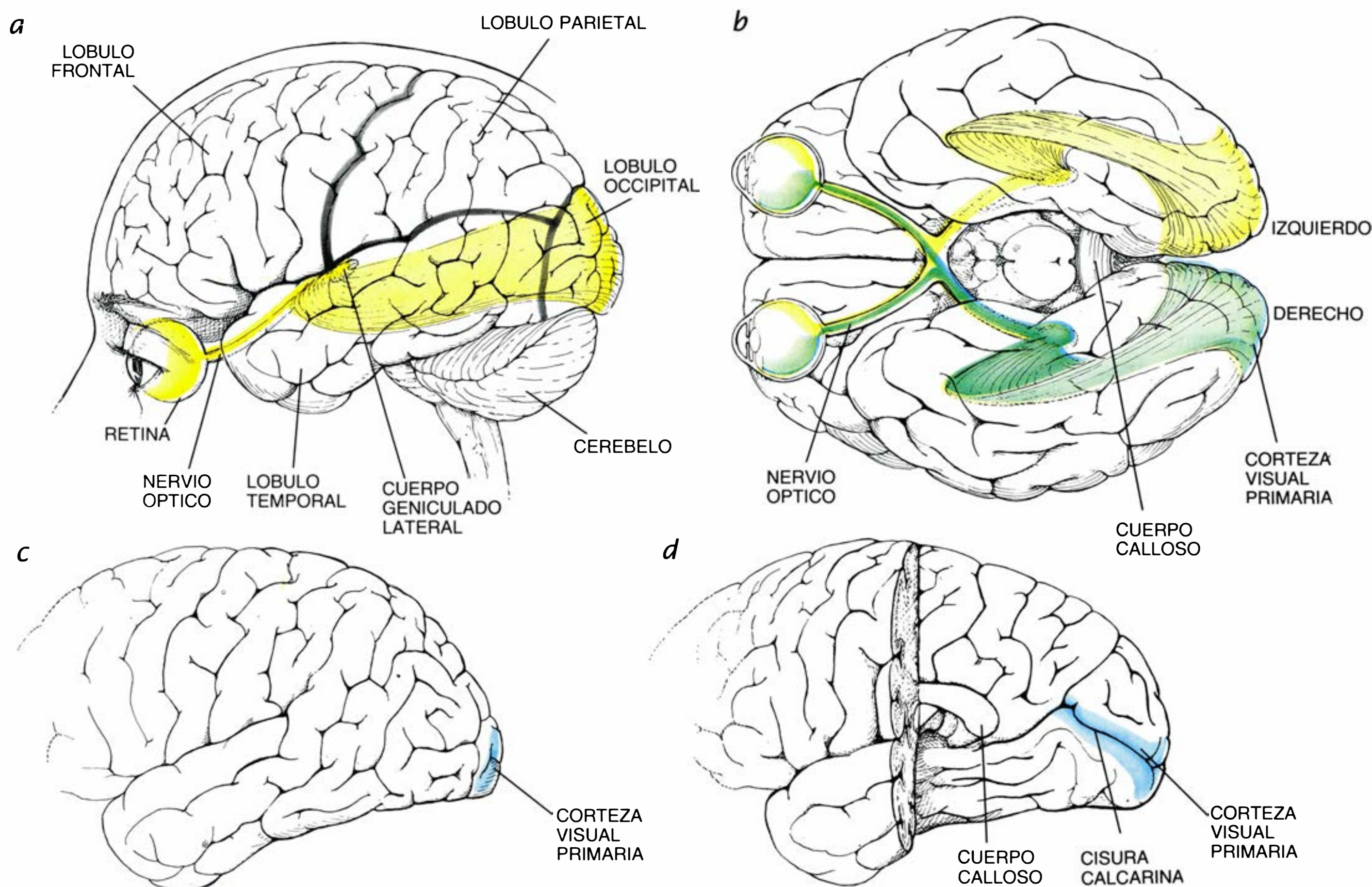
Otros dos autores reclamaron, o se les atribuyó, la identificación de tal línea. Samuel Thomas Soemmering, catedrático de anatomía de la Universidad de Göttingen, insistió en un libro publicado en 1778 que había descrito la banda cuatro años antes de que lo hiciera Gennari. Efectivamente, Soemmering había mencionado en su libro la línea, pero la había descrito como amarillenta y la situaba en el cerebelo, donde no aparece. Lo que Soemmering había visto era, probablemente, una de las capas de la sustancia gris que cubre el cerebelo o bien un artefacto del método que empleó en el examen.

Pese a las pretensiones de Soemmering, el descubrimiento de la línea solía atribuirse al eminente anatomista francés Félix Vicq-d'Azyr. En 1786, cuatro años después de que apareciera la monografía de Gennari, Vicq-d'Azyr describió la línea blanca y su localización en el voluminoso y bello *Traité d'Anatomie*. Dado el prestigio del francés, llegó a darse su nombre a la línea. Por fin, en 1882, el anatomista austriaco Heinrich Obersteiner revisó las fechas de las contribuciones de Gennari y Vicq-d'Azyr y se rebautizó la estructura como línea de Gennari.

Gennari es hoy uno de los anatomistas más citados de todos los tiempos, pero su nombre no les resulta familiar a la mayoría de la gente de la ciudad donde vivió e incluso a muchos alumnos de la universidad donde realizó su descubrimiento. Es más, hasta mi estancia en condición de profesor visitante en la Universidad de Parma, en 1983, poco se había escrito sobre su vida. Ante la escasez de la información, colaboré con Giacomo Rizzolatti, del Instituto de Fisiología Humana de esa universidad italiana, para recopilar más datos sobre la historia personal de Gennari.

Nació, según averiguamos, a unos 25 kilometros de Parma, en el pequeño pueblo de Mattaleto, en las faldas de los Apeninos. Concluyó los estudios de medicina en 1776 y ganó una plaza en el Colegio de Médicos, tras lo cual estableció consulta y prosiguió los estudios anatómicos que fructificarían en su





2. RUTA BASICA de las señales visuales a través del cerebro; se muestra en perspectiva lateral (*a*) e inferior (*b*). La retina convierte en impulsos nerviosos la luz que procede de los objetos observados y los transmite, a través del nervio óptico, a un conjunto de neuronas situado en lo más profundo del cerebro: el cuerpo geniculado lateral. Desde éste los impulsos viajan a la corteza visual primaria, que se encuentra en el lóbulo occipital, el más dorsal, de cada hemisferio. Las señales del lado derecho del campo visual (*amarillo*) se dirigen al lóbulo occipital del hemisferio izquierdo y, las del lado izquierdo de la visión (*verde*), al hemisferio derecho. La corteza visual primaria (*detalles en azul*) constituye parte de la corteza cerebral (la hoja replegada de materia gris que recubre los hemisferios). La forman una pequeña parte de la superficie más externa de cada lóbulo occipital (*c*) y otra parte, mucho mayor, de la superficie media (*d*).

libro. Un año después de publicarlo, obtuvo una beca para proseguir sus trabajos en la universidad, pero no volvió a publicar. Gennari murió, pobre y enfermo, a los 45 años de edad, después de varios años de penuria y miseria, consecuencia en parte de su irrefrenable afición al juego.

Antes de perder el rumbo de su vida, Gennari fue un científico de notable astucia. Convencido de que las variaciones estructurales que advertía en la corteza debían reflejar diferencias de funcionamiento, carecía de medios para saber en qué podían consistir esas diferencias funcionales.

Poco después de la publicación de la monografía de Gennari se iniciaron importantes experimentos sobre la función cortical. En un trabajo clásico, los investigadores lesionaban el cerebro de los animales y estudiaban las deficiencias consecuentes. Estas experiencias, junto con las observaciones de los defectos encontrados en seres humanos que habían sufrido lesiones cerebrales, propiciaron que, en 1850, se reconociera el papel esencial que desempeña la corteza cerebral en el movimiento, sensación y memoria normales.

A pesar de ello, no se disponía aún de pruebas incuestionables para avanzar hasta la siguiente conexión, decisiva: a cada lesión le corresponde un defecto funcional específico. De hecho, la limpia noción de localización cortical se ganó mala fama por culpa de la frenología, una moda pseudocientífica nacida en la primera mitad del siglo XIX. Franz Joseph Gall, destacado anatomista que trabajó en Viena y luego en París, imaginó que el cerebro poseía tantas regiones cuantas facultades psicológicas tenemos. Argumentó que la forma del cráneo reflejaba la forma del cerebro que encerraba y que los rasgos de la personalidad y el carácter —como la crueldad o la gula— podían valorarse explorando la cabeza. El discípulo de Gall, Johann Spurzheim, extendió el modelo y obtuvo cierto apoyo de la clase médica, así como un entusiasmado séquito popular.

Las pruebas experimentales de que se disponía en la primera mitad del siglo XIX parecían apuntar en contra de la localización. Por ejemplo, el fisiólogo francés Pierre Flourens publicó que la lesión del cerebro anterior provocaba en los animales una mezcla de efectos; una sola incisión les causaba trastornos sensoriales, dificultades para entender lo que veían y sentían y para iniciar el movimiento. Concluyó, por consiguiente, que la sensación, percepción y volición eran inseparables, que lo que las controla se encontraba difuso por la corteza. Y proclamó que "la unidad es el gran principio, está en todas partes, lo domina todo". "Por tanto, el sistema nervioso forma un sistema unitario". Las mentes sensatas apoyaron a Flourens.

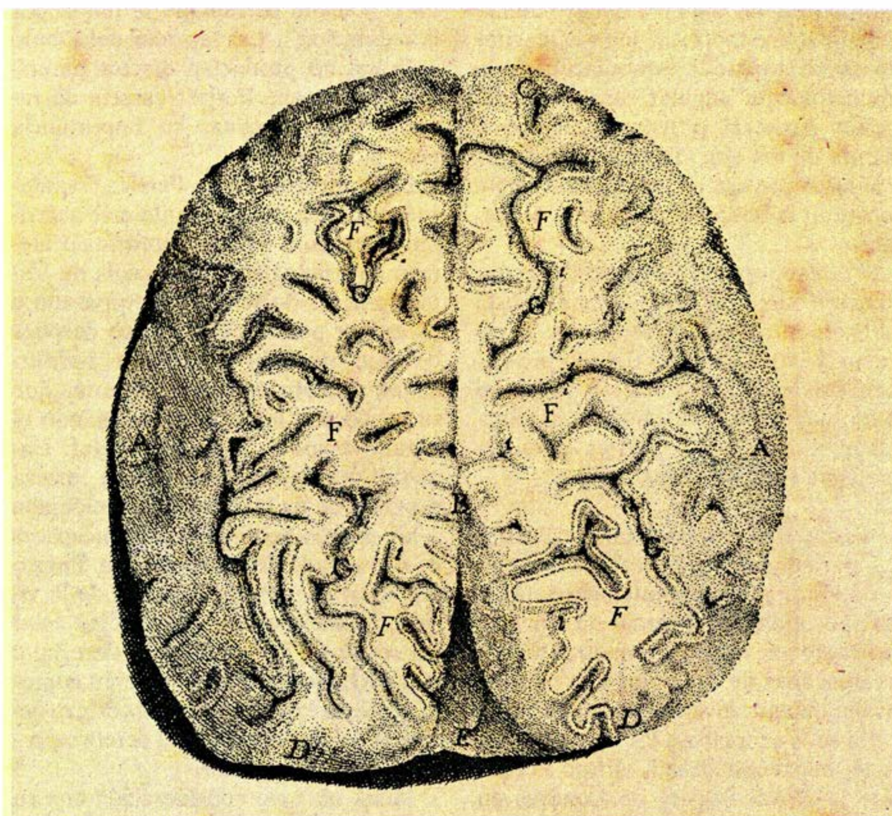
Por fin, durante el último cuarto del siglo XIX, tres descubrimientos devolvieron el atractivo al concepto de la lo-

calización. En 1861, el médico francés Pierre Paul Broca informó de que la lesión del lóbulo frontal izquierdo le había provocado un trastorno permanente del habla a uno de sus pacientes. Unos años más tarde, John Hughlings Jackson, neurólogo londinense, describió un tipo de ataque epiléptico que se iniciaba con el movimiento rítmico de una parte del cuerpo y que se extendía a las regiones vecinas siguiendo una secuencia definida. El comportamiento sugería una organización cerebral en la que las regiones cerebrales adyacentes controlaban partes adyacentes del cuerpo.

Más tarde, en 1870, los fisiólogos alemanes Gustav Theodor Fritsch y Eduard Hitzig hicieron un experimento que constituiría el factor argumental más importante para el inicio de nuevas investigaciones sobre la localización cortical. Estimularon eléctricamente diversas zonas de la corteza del lóbulo frontal de un perro y observaron que el estímulo instaba el movimiento de un miembro o alguna otra parte del lado contrario del cuerpo. Si se extirpaba una zona cuya estimulación había provocado el movimiento de un miembro, el animal movía luego con torpeza ese miembro. Fueron diversas las interpretaciones que se dieron al experimento, pero una explicación razonable sostenía que, a pesar de las indicaciones anteriores en sentido contrario, al menos parte de la corteza estaba especializada en el control de una función específica: el movimiento.

La investigación prosiguió en las regiones que controlaban otras funciones, en particular la visión. David Ferrier, neurólogo y fisiólogo británico, fue quien primero afirmó haber identificado el centro de la visión; empezó trabajando en un espacio habilitado como laboratorio en el manicomio de West Riding, Yorkshire, y luego se trasladó al King's College de Londres.

Anotando sistemáticamente los efectos de la corriente alterna sobre los cerebros de animales, Ferrier confirmó que la estimulación de ciertas partes originaban tipos específicos de movi-



FRANCISCI GENNARI

PARMENSIS

MEDICINAE DOCTORIS COLLEGIATI

DE PECULIARI

STRUCTURA CEREBRI

NONNULLISQUE EJUS MORBIS.

PAUCAE ALIAE ANATOM. OBSERVAT.

ACCEDUNT.



PARMAE

EX REGIO TYPOGRAPHEO

M. DCC. LXXXII.

CUM APPROBATIONE.

3. LINEA DE GENNARI, una capa blanca (*l, arriba*) de la corteza cerebral gris, representada en una ilustración fechada en 1782 de una sección de cerebro. El dibujo apareció en una monografía escrita por el descubridor de la línea: Francisco Gennari. La observación de la banda, que es más prominente en la corteza visual primaria, constituyó el primer reconocimiento de que la corteza presenta subdivisiones estructurales, lo que indujo a Gennari a suponer, acertadamente, que la corteza posterior del cerebro debía desempeñar alguna función especial.

miento. En el King's College, donde trabajó sobre todo con monos, encontró asimismo que la estimulación de la circunvolución angular, una zona del lóbulo parietal, provocaba el movimiento de los ojos. El hallazgo sugirió a Ferrier que esa circunvolución debía constituir la buscada zona visual del cerebro.

Para comprobarlo, extirpó la circunvolución angular y observó la respuesta de los monos. La extirpación de la estructura en sólo un lado del cerebro parecía privar a los simios de la visión en el ojo contrario a la lesión; si se extirpaban ambas, los animales parecían quedarse completamente ciegos.

Las pruebas que presentaba Ferrier para demostrar la pérdida completa de visión eran bastante anecdóticas. Así, por ejemplo, informó de que uno de los monos, muy aficionado al té, parecía incapaz de distinguir una taza colocada delante mismo de sus ojos.

"Si se le acercaba a los labios la taza de té, bebía con ansia", afirmó Ferrier ante la Royal Society de Londres en 1875 y, un año más tarde, en su libro *Functions of the Brain*. "Se le apartó entonces la taza y, aunque deseaba intensamente seguir bebiendo, como lo indicaban sus gestos, el animal fue incapaz de encontrarla, a pesar de que dirigía la vista directamente a ella. Se repitió la prueba varias veces, obteniéndose siempre el mismo resultado. Por fin, al devolverle la taza a los labios, se la empujó hacia la cabeza y siguió bebiendo, pese a que cada vez estaba más vacía y había derramado la mitad por la habitación". Las lesiones del lóbulo occipital no producían efectos parecidos, por lo que Ferrier carecía de razones para imaginar su importancia para la visión.

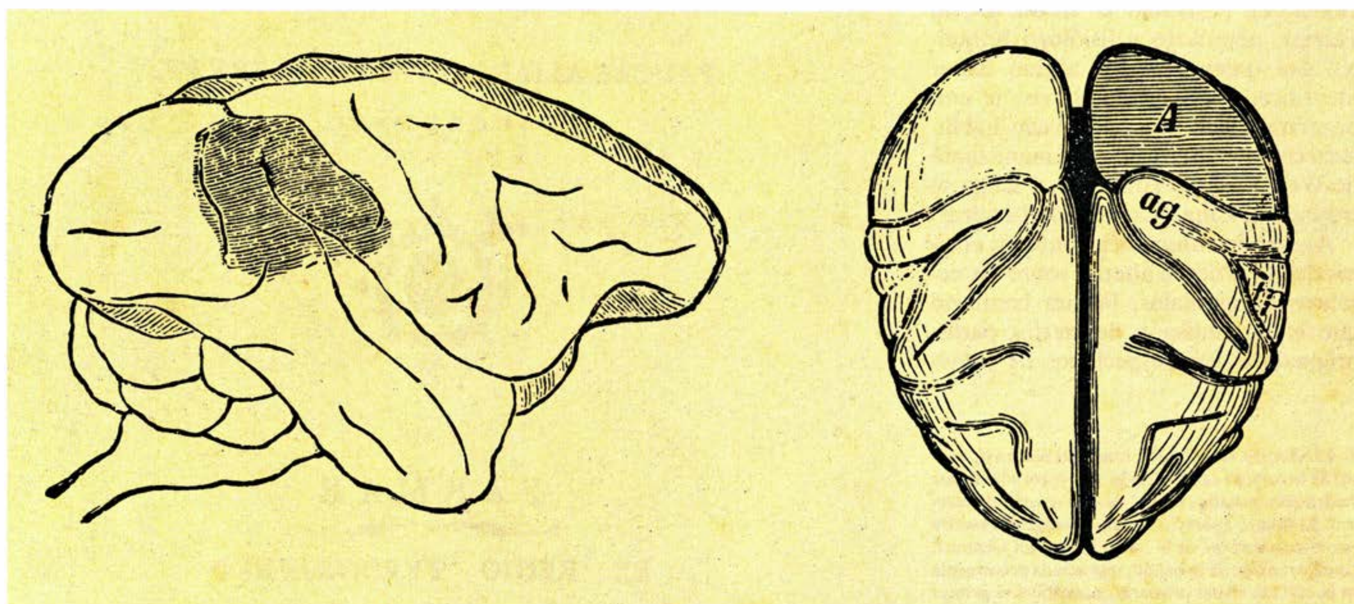
Las conclusiones de Ferrier levantaron polémica. Su oponente más acérrimo, Hermann Munk, catedrático alemán de fisiología de la Escuela de Veterinaria de Berlín, había empezado a investigar por su cuenta poco después de que también lo hiciera Ferrier. Munk descubrió, acertadamente, que se provocaba la ceguera lesionando el lóbulo occipital, y no el parietal. Encontró que la extirpación de la corteza occipital de un lado del cerebro dejaba a los monos hemianópticos: incapaces de ver un lado del campo visual. Puesto que cada ojo perdía la mitad de la visión, Munk concluyó que debían estar conectados a los hemisferios derecho e izquierdo del cerebro. También comunicó que la extirpación de la corteza occipital de ambos lados del cerebro producía la ceguera total.

Munk no tuvo consideración con su oponente. En una publicación de 1881 cita dos comentarios que había realizado en la Sociedad de Fisiología de Berlín: "En mi primera comunicación sobre la fisiología de la corteza, que realicé en marzo del año pasado, no dije nada sobre las investigaciones con monos de Ferrier porque no había nada bueno que decir".

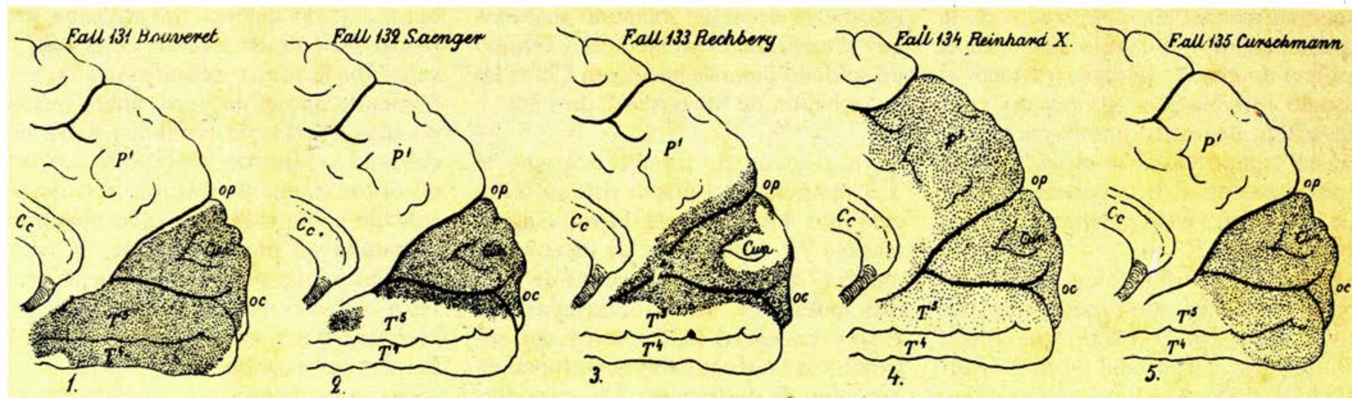
Sin embargo, cuando en una sesión posterior se le pidió que expresase sus opiniones, Munk ya no se mordió la lengua. Primero se refirió a varias de las conclusiones de Ferrier, incluida no sólo su afirmación de que la circunvolución angular era el centro visual del mono, sino también a su hipótesis de que ¡el lóbulo occipital era el asiento del apetito! Más tarde dijo que las declaraciones de Ferrier "son interpretaciones sin valor y gratuitas, pues los animales operados los examinó el Sr. Ferrier de forma muy insuficiente y sólo en momentos de depresión general de la función cerebral. Si mis afirmaciones, basadas en una visión general de los experimentos del Sr. Ferrier, han ido demasiado lejos repararé la injuria, y cuanto antes mejor. Sin embargo, como muestran ahora los experimentos, más bien me he quedado corto. Ninguna de las suposiciones del Sr. Ferrier era correcta, todos sus informes han resultado estar equivocados."

La acritud en la relación entre esos dos investigadores fue tal que, en el siglo XIX, el psicólogo y filósofo William James decía en su texto de psicología lo siguiente: "el asunto de la localización de las funciones cerebrales parece ejercer un efecto peculiar sobre el temperamento de quienes lo cultivan experimentalmente... El tono absoluto de Munk sobre sus observaciones y su arrogancia teórica han arruinado su autoridad".

Como sabemos, Munk no cayó en el descrédito y sigue reconociéndosele la demostración de que el lóbulo occipital desempeña un papel especial en la visión. Sin embargo, también me-



4. LESIONES practicadas en el cerebro de monos, que ofrecieron en primera instancia datos contradictorios sobre la localización del principal centro cerebral de la visión. En 1876, el neurólogo David Ferrier publicó que la extirpación de una región del lóbulo parietal, la circunvolución angular (*zona sombreada triangular, a la izquierda*), cegaba a los monos. Sugirió que en esa región se asentaba la visión. El fisiólogo Hermann Munk se mostró en abierto desacuerdo; sus estudios indicaban que el lóbulo occipital (*zona A, a la derecha*) era el responsable de la visión. Trabajos posteriores demostraron que Munk tenía razón.



5. LESIONES CEREBRALES (*zonas sombreadas*) **sufridas por pacientes parcialmente ciegos descritas en 1890 por el neuropatólogo sueco Salomen Eberhard Henschen, de la Universidad de Uppsala. Los dibujos, que muestran la superficie media del lóbulo occipital, representan algunos de los casos que estudió. Estos trabajos ayudaron a confirmar la hipótesis de Munk, según la cual el centro de visión del cerebro humano está situado en los lóbulos occipitales.**

rece atención el trabajo de Ferrier, porque siguen aún planteadas varias cuestiones y porque los resultados que obtuvo arrojaron nueva luz sobre la organización visual del cerebro.

¿Por qué no apreció Ferrier la pérdida de visión al lesionar los lóbulos occipitales de los monos y por qué motivo parecían quedarse ciegos al dañarse las circunvoluciones angulares? Se explica fácilmente la incapacidad de Ferrier para cegar los monos dañándoles el lóbulo occipital de ambos hemisferios. En casi todas las ocasiones extirpó un gran pedazo de los lóbulos —la sección que se encuentra detrás de la cisura lunada, un surco profundo. Habría eliminado así la mayor parte de la corteza visual primaria, pero no toda ella. Conservando sólo unos pocos milímetros de la corteza, los animales mantendrían un grado considerable de visión, pues, como se aclarará más tarde, se proyecta una gran zona del campo visual periférico en cantidades relativamente pequeñas de la corteza visual primaria.

Los monos de Ferrier habían probablemente perdido la visión central, pero no se habían quedado ciegos. Quizá compensaban en gran medida la pérdida de visión. Los monos aprenden con rapidez a explotar cualquier resto de visión que sobreviva a una lesión cerebral, y les ayuda en ese empeño su capacidad para mover con rapidez los ojos y la cabeza. Cabe además que Munk provocara la ceguera extendiendo el daño a una porción mayor de la cara media de los lóbulos: la superficie interna que se encara al hemisferio opuesto. La mayor parte de la corteza visual primaria se encuentra en la superficie media.

¿Por qué parecían ciegos los monos que habían perdido las circunvoluciones angulares? Las descripciones que hizo Ferrier de la actividad de los animales indican que lo que había descubierto involuntariamente no era el centro visual del cerebro, sino una región de gran importancia en el control del movimiento guiado de la visión: la facultad que le permite a uno alcanzar una mora en una zarza o atravesar una calle concurrida sin chocar contra alguien o algo. Los monos de Ferrier no podían guiar ya los movimientos de acuerdo con lo que veían, y por esa razón les costaba alcanzar el alimento que tenían delante.

El propio Ferrier debió acabar advirtiendo su error. En los primeros experimentos, dejaba que los monos sobrevivieran sólo tres o cuatro días a la operación, pues la infección resultaba inevitable. Posteriormente, cuando aplicó los procedimientos quirúrgicos en condiciones estériles de Joseph Lister, gracias a lo cual los monos sobrevivían y sanaban, se dio cuenta de que los monos no estaban ciegos. En las descripciones de los simios recuperados queda claro que el efecto más importante de la operación era la aparición de trastornos del movimiento guiado por la visión.

Mientras Ferrier prosiguió con sus estudios de la circunvolución angular, ganaron aceptación las conclusiones de Munk de que la visión se asentaba en el lóbulo occipital. En 1890, Edward Albert Sharpey-Schäfer, catedrático de fisiología del University College de Londres, obtuvo los mismos resultados que Munk y muchos médicos habían descrito la aparición de ceguera parcial en pacientes que habían sufrido una lesión del lóbulo occipital.

El neuropatólogo sueco Salomen Eberhard Henschen, de la Universidad de Uppsala, resumió el historial clínico en 1892. Compiló todos los trabajos disponibles que se ajustaran a dos criterios: que describieran casos en los que, por lesión cerebral, se hubiera perdido la mitad derecha o izquierda del campo visual y que incluyeran un informe de la autopsia donde se citara el sitio de la lesión cerebral en el hemisferio afectado. En todos los casos la lesión interesaba a la región de la corteza occipital que rodea y comprende un prominente surco de la superficie media de ambos hemisferios: la cisura calcarina. Esta región contiene la porción de la corteza en la que más destaca la línea de Gennari.

Así, más de un siglo después, Henschen confirmó la sospecha inicial de Gennari de que la corteza dotada de aquella prominente línea —la corteza estriada— desempeñaba una función singular. Henschen demostró que la corteza estriada era nada menos que el centro visual primario del cerebro.

Si el mundo visual se proyectaba en la corteza visual, ¿cómo se disponía el mapa? Henschen observó acertadamente que el campo visual inferior se situaba sobre el borde superior de la fisura calcarina y, el campo visual superior, sobre el borde inferior. Propuso también que el centro del campo visual se proyectaba en la parte dirigida hacia la corteza estriada y, la periferia del campo visual, en las partes posteriores; pero esta aseveración es incorrecta.

Henschen llegó a una conclusión equivocada porque los datos de que disponía no eran suficientemente precisos: los pacientes en quienes había basado su hipótesis presentaban lesiones de gran tamaño. Se necesitaba, por contra, pacientes con lesiones parciales de la corteza estriada y que hubieran perdido la visión en una región del campo visual. Tales casos suelen ser producto de las guerras. No tardó en llegar una.

En 1904 y 1905, tropas del ejército imperial ruso y japonesas se enfrentaron duramente en varias campañas. La guerra movilizó más de 500.000 soldados y sus bajas brindaron al joven médico japonés Tatsuji Inouye suficientes datos para desarrollar el primer

esquema razonablemente exacto de la representación del campo visual en el cerebro humano. Inouye trastocó el modelo topológico propuesto por Henschen; demostró que la parte central del campo visual se proyectaba en la parte posterior de la corteza visual y que el campo visual periférico se proyectaba delante.

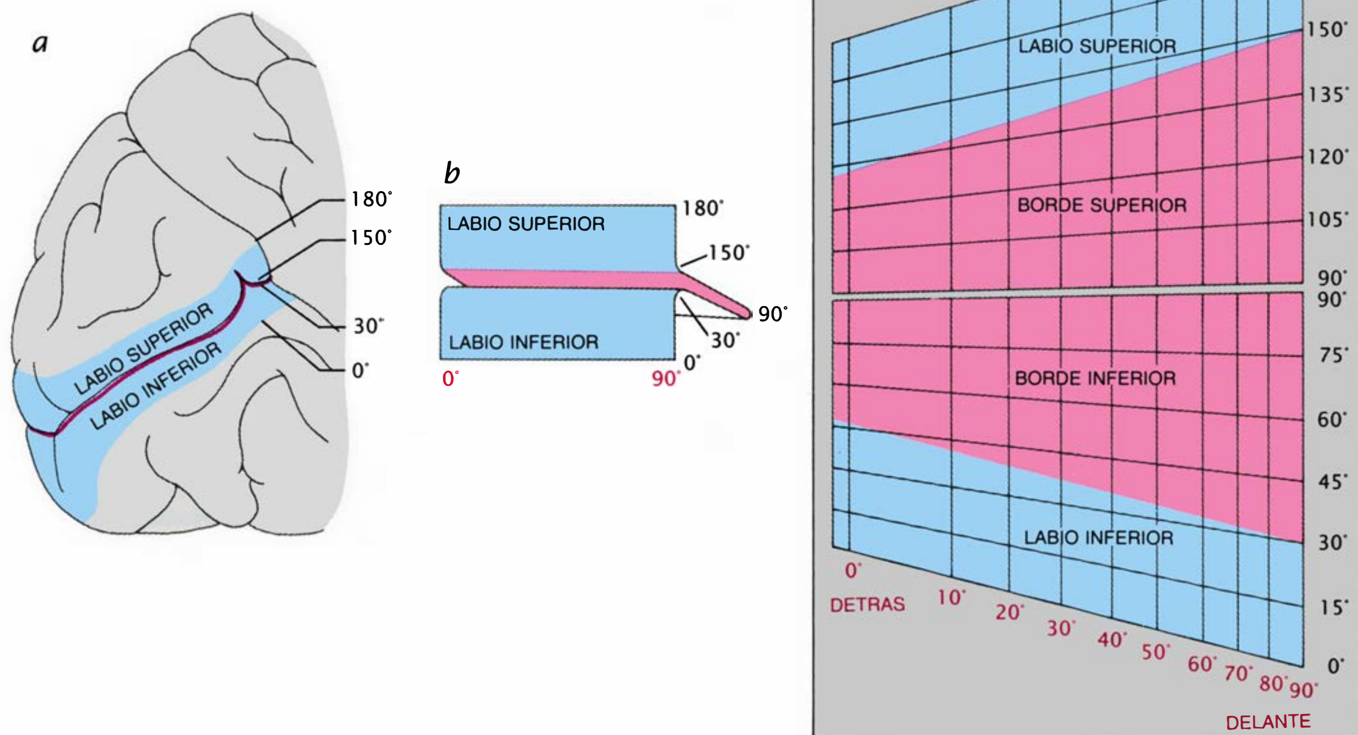
Pese a su contribución a la neurología, Inouye ha pasado casi ignorado durante muchos años; olvido que David Whitteridge, colega mío de la Universidad de Oxford, y yo deseamos enmendar. Tras encontrar la pista a la monografía que Inouye redactó (en alemán) en 1909, la hemos traducido al inglés; tambien hemos establecido contacto con su familia en Japón para informarnos sobre su biografía.

Inouye, nacido en Tokyo en 1881, cursó estudios de medicina en la universidad de esa ciudad e inició las investigaciones bajo la dirección de un destacado oftalmólogo el año anterior a que estallara la guerra ruso-japonesa. Fue médico militar y atendió a muchos soldados japoneses que habían perdido la visión tras sufrir heridas de bala en la cabeza. También examinó soldados que le enviaron otros médicos y estudió un soldado japonés herido en China en la "rebelión de los bóxers" de 1900.

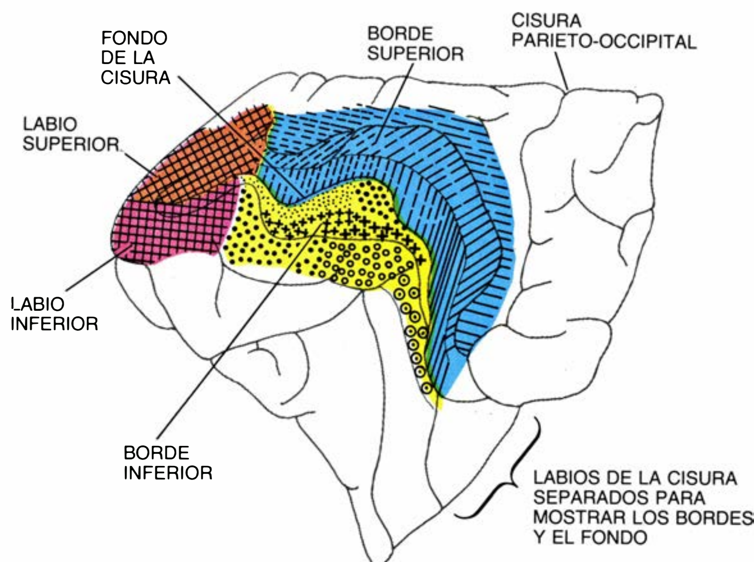
En el guión de Inouye intervino la aparición del nuevo rifle introducido por los rusos, el Mosin-Nagant modelo 91, cuyas balas, de menor diámetro (7,6 milímetros) que las de guerras anteriores, salían disparadas con mayor velocidad (620 metros por segundo); las nuevas balas penetraban en el cráneo sin destrozarlo. Los pacientes quedaban inconscientes entre unas horas y varios días, pero se recuperaban lo suficiente para cooperar en los estudios de Inouye. (Y tenían un interés especial en hacerlo: las pensiones se computaban de acuerdo con la cuantía del daño visual que habían sufrido.)

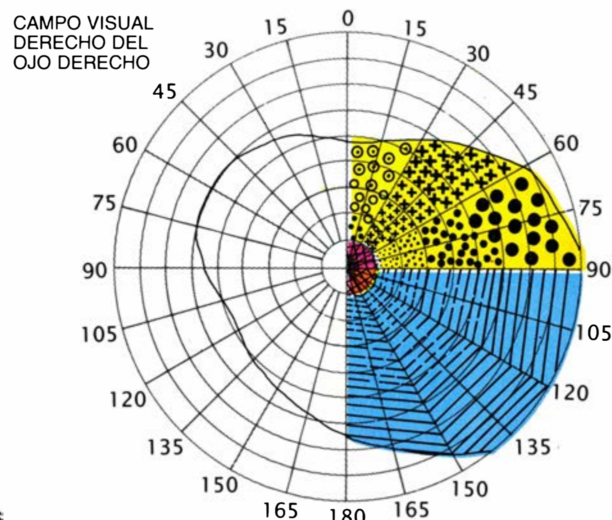
Inouye basó su descripción del mapa cortical en los datos de 29 pacientes. Con cada uno de ellos realizó un dibujo detallado del campo visual de los ojos (pues ambos suelen ver imágenes ligeramente distintas) y marcaba el sitio de la herida en el cráneo. Para determinar exactamente qué parte del cerebro había resultado dañada, identificaba los puntos de entrada y salida de la bala y calculaba la zona cerebral afectada, suponiendo que el proyectil había seguido una trayectoria rectilínea a través del tejido craneano. Consideró acertado el razonamiento porque, cuando el soldado había sido alcanzado mientras disparaba en posición prona, la bala entraba y salía del cráneo y luego volvía a entrar en el cuerpo en el hombro o el antebrazo; en tales casos, las tres heridas se ajustaban a una línea recta (otra consecuencia de la celeridad de las balas rusas).

Además de corregir el error de Henschen sobre la orientación del mapa, el esquema de Inouye reveló un hecho fundamental sobre la organización de la corteza visual estriada: la imagen no conserva sus proporciones al proyectarse sobre la corteza. Inouye no logró representar correctamente las proporciones de la proyección, pero sí reconoció que una fracción desproporcionadamente grande de la corteza estriada se dedica al campo visual central, como cabe esperar de la elevada concentración de células visuales que



6. ESQUEMA DE INOUYE, de 1909, que muestra la proyección del campo visual en la corteza visual primaria, es decir, en los labios (*azul*) y los bordes (*rosa*) de la cisura calcarina. (Aquí, el lado derecho del campo visual se proyecta en el lóbulo occipital (*a*) del hemisferio izquierdo.) Inouye describió la topografía del campo visual (que no se muestra aquí) mediante un sistema de coordenadas en el que el eje horizontal se calibraba en grados de "azimut", desde −90 grados, a la izquierda, hasta 90 grados, a la derecha, y el eje vertical en grados de "elevación", desde cero, arriba, hasta 180, abajo. El lado derecho del campo visual corresponde a los puntos situados a la derecha del eje vertical. Para realizar el esquema, Inouye extendió la cisura (*b*) de modo que quedaran expuestos los bordes. Seguidamente dibujó el azimut (*rojo*) a lo largo de la dimensión horizontal de la cisura y la elevación (*negro*) a lo largo del eje vertical (*c*). El diagrama muestra que el centro del campo visual se proyecta en la parte posterior del lóbulo occipital, mientras que las partes más periféricas se representan hacia el frente del lóbulo. Se observa, asimismo, que la proyección no es proporcional: se dedica a la visión central una zona exageradamente grande de la corteza.





7. UN ESQUEMA DISTINTO de la proyección del campo visual (*color*) en la corteza visual del lóbulo occipital, desarrollado por Gordon Holmes en 1918. (El centro del campo visual está situado en el centro del entramado). Las imágenes son originales de Holmes, aunque se han sustituido sus símbolos, se han añadido rótulos y se ha coloreado. Este esquema no tardó en sustituir al de Inouye, pues resultaba más comprensible y reflejaba que la zona dedicada al centro del campo visual era desproporcionadamente grande, tanto en sentido vertical como horizontal. El de Inouye mostraba sólo una ampliación horizontal.

se da en la región macular de la retina (la región del foco central).

Inouye murió hace sólo 12 años, a los 96 de edad, pero sus investigaciones han sido ignoradas durante mucho tiempo. Ello se explica, en parte, porque, durante la primera guerra mundial, el célebre neurólogo británico Gordon Holmes y su colega William Tindall Lister propusieron un guión más accesible y refinado de la representación del campo visual. Desde entonces, ese esquema se ha reproducido profusamente.

En líneas generales, Holmes y Lister trazaron su diagrama siguiendo el mismo procedimiento que Inouye. Habían sido destinados a hospitales de campaña, donde estudiaron las pérdidas de visión que seguían a las lesiones del lóbulo occipital. Aunque sus hallazgos coincidían en gran parte con los de Inouye, discrepaban en un punto importante. Inouye y varios investigadores anteriores y posteriores a él encontraron que los pacientes rara vez perdían la mitad entera del campo visual cuando habían sufrido una lesión difusa en el lóbulo occipital izquierdo o derecho. Seguían viendo una pequeña región del centro (la parte que incidía en la mácula), señal de que la región central se proyectaba por duplicado, en ambos lados del cerebro.

Holmes y Lister negaron rotundamente que existiera tal "mácula de repuesto"; creían que en todos esos casos la lesión del lóbulo occipital había sido incompleta. ¿Quién tenía razón? Probablemente exista un repuesto macular, pero no todos los casos responden a las mismas explicaciones.

Las investigaciones de Holmes y Lister completaban en lo fundamental el capítulo de la historia dedicado al descubrimiento de la corteza visual primaria y a la descripción pionera de su funcionamiento. Sin embargo, debe señalarse que ni ellos ni los demás autores mencionados en este artículo fueron los únicos protagonistas de esa obra desarrollada a lo largo de varias décadas; me he ceñido a algunos personajes principales, centrándome en aquellos cuyas contribuciones no se reconocieron como era debido.

A partir de la introducción de los esquemas de Inouye y Holmes se han multiplicado nuestros conocimientos sobre la organización de la corteza cerebral en general y sobre la estriada en particular. Se sabe ahora que las zonas de la corteza situadas junto a la corteza estriada y detrás de ella, sobre los lóbulos temporales y parietales, desempeñan una función fundamentalmente visual y reciben sus principales señales de entrada directa o indirectamente de la corteza estriada. En los monos y los seres humanos, casi la mitad de la corteza cerebral se dedica al tratamiento de la imagen. El estudio del papel que desempeña el cerebro en la visión no ha concluido. En el futuro habrá que aclarar las funciones que corresponden a las zonas extraestriadas: ¿cómo procesa el sistema visual el color, la forma y el movimiento? ¿Cómo se emplea esa información para reconocer los objetos familiares y para guiar los movimientos?

Al abordar esos asuntos, muchos investigadores miran más hacia el futuro que hacia el pasado; sin embargo, el conocimiento de la historia ayuda a mantener en su justa perspectiva los avatares, a menudo frustrantes, de la investigación. En la inmensa mayoría de los nuevos frentes de la ciencia, los progresos fueron primero lentos, hasta que los avances técnicos y teóricos posibilitaron los descubrimientos fundamentales. Más tarde, las investigaciones de laboratorio con animales aclararon la visión, inicialmente caótica, de la organización cerebral. La investigación condujo frecuentemente a conclusiones erróneas; pero el progreso posterior confirmó los hechos y resolvió los rompecabezas. Los resultados han permitido a los clínicos alcanzar un mejor conocimiento de los problemas de sus pacientes e introducirnos en una era de prolífica investigación en la muy notable labor del cerebro humano.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE HUMAN BRAIN AND SPINAL CORD: A HISTORICAL STUDY ILLUSTRATED BY WRITINGS FROM ANTIQUITY TO THE TWENTIETH CENTURY. Edwin Clarke y C. D. O'Malley. University of Cali Press, 1968.

FRANCESCO GENNARI AND THE STRUCTURE OF THE CEREBRAL CORTEX. Mitchell Glickstein y Giacomo Rizzolatti en *Trends in Neuroscience*, vol. 7, n.º 12, págs. 464-467; diciembre de 1984.

FERRIER'S MISTAKE. Mitchell Glickstein en *Trends in Neuroscience*, vol. 8, n.º 8, págs. 341-344; agosto de 1985.

TATSUJI INOUYE AND THE MAPPING OF THE VISUAL FIELDS IN THE HUMAN CEREBRAL CORTEX. Mitchell Glickstein y David Whitteridge en *Trends in Neuroscience*, vol. 10 n.º 9, págs. 350-353; septiembre de 1987.

Taller y laboratorio

El fenómeno del frente de onda de choque y otras curiosidades capaces de distraernos en un vuelo gris

Jearl Walker

Cuando un avión de pasajeros vuela a su altura de crucero, rasga el aire a una velocidad de centenares de kilómetros por hora. A través de ese alud de aire vemos el paisaje o las nubes cuando miramos por las ventanillas de la cabina, aunque nuestra visión acostumbra a ser tan nítida que fácilmente olvidaremos la presencia, junto a la ventanilla, de una corriente de aire violentísima.

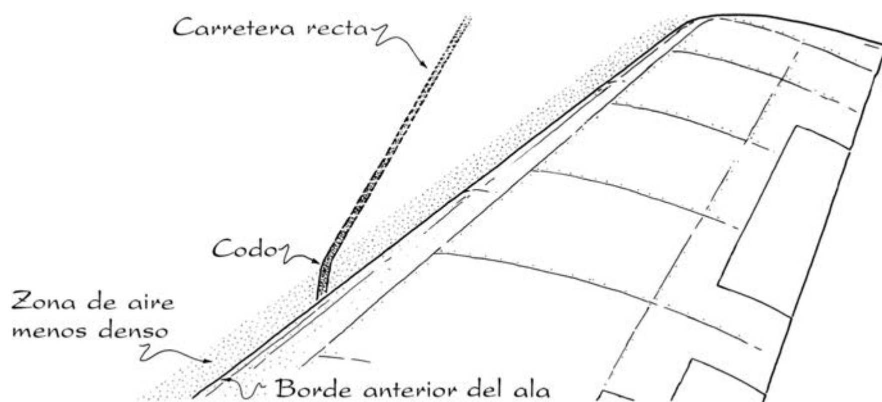
Sin embargo, esa corriente es perfectamente evidente para quien se halle sentado detrás de un ala y mire el paisaje a través de la fuerte turbulencia que produce el escape de un motor de reacción. Las caóticas variaciones de la densidad del aire dentro del chorro de escape alteran la dirección de los rayos reflejados en el suelo. Los gases turbulentos refractan al azar esos rayos, con lo cual nos parece que los accidentes del paisaje se contornean en una extraña danza. Esta se presenta menos activa cuando el avión está en tierra, puesto que entonces el flujo de aire a través del motor resulta ser mucho menor.

Hay otros indicios menos claros que revelan a veces el movimiento del aire con respecto a un avión en vuelo. En su libro *Science from Your Airplane Window*, Elizabeth A. Wood comenta un dato sutil: los objetos del suelo pueden aparecer deformados cuando los rayos de luz procedentes de los mismos pasan próximos a la parte anterior del ala. Esta deformación la descubrió Wood estando sentada cerca del borde anterior del ala, al observar con detenimiento una carretera que atravesaba de parte a parte el terreno, formando un ángulo con el ala. A la par que el avión avanzaba por encima del terreno, la carretera parecía desaparecer gradualmente de la vista por debajo del ala. Y, aunque aquella carretera era recta, el tramo inmediatamente contiguo a la parte frontal del ala parecía siempre acodarse hacia ésta [*véase la figura 1*].

Desde luego, aquel acodamiento de la carretera era ilusorio. Cuando un ala se mueve por el interior del aire, parte de éste es impelido hacia la cara superior de aquélla; la velocidad de ese aire aumenta y su densidad disminuye. Esta variación comienza a producirse un poco por delante del ala. Cuando Wood observaba la carretera a lo largo del borde anterior del ala, interceptaba rayos que atravesaban esa zona de aire menos denso, y esa variación en la densidad refractaba los rayos ligeramente hacia arriba. Ahora bien, cuando un rayo de luz penetra en nuestros ojos, lo extrapolamos automáticamente hacia atrás, percibiendo su origen sin tener en cuenta las inflexiones que haya podido sufrir durante su trayecto hacia nosotros. Tal fue el caso de Wood y los rayos refractados. La desviación de los rayos hacia la vertical hacía que parte de la carretera pareciera caer más cerca del ala. Como los rayos procedentes de los puntos de la carretera alejados del ala no pasaban por la zona de aire menos denso, sus orígenes se percibían correctamente. La curva aparente de la carretera se encontraba precisamente en el punto donde se unían las imágenes desplazada y no desplazada de la carretera.

Siendo ésta la explicación correcta de la ilusión, hay, sin embargo, un detalle que me ha tenido preocupado durante cierto tiempo: la reducción en la densidad del aire contiguo a un ala parecía demasiado pequeña para refractar perceptiblemente la mayoría de los rayos. Partí de la siguiente suposición en lo relativo a cómo ejercía la refracción su efecto: todo rayo se refracta al cruzar la frontera de la zona de aire menos denso, de tal manera que, cuando penetra por la parte inferior de la zona, se refracta desviándose hacia la frontera. Es decir, un rayo que inicialmente esté apuntado hacia arriba, tras la refracción estará más vertical. Seguidamente viajará en línea recta por la zona hasta salir de ella, con lo cual se refracta alejándose un poco de la frontera, y esa refracción vuelve a rotarlo hacia la vertical. Me preocupaba, en concreto, que si el aire era sólo moderadamente menos denso junto al ala, la refracción sería importante sólo para los rayos que atravesaran la frontera bajo ángulos muy oblicuos; los pocos rayos que poseyeran tal ángulo de aproximación a duras penas serían capaces de producir la ilusión.

Finalmente me di cuenta de mi error con una vista próxima, más detallada, del pequeño tramo de carretera desplazada. A partir del punto donde se inicia la curva, la intensidad del corrimiento ilusorio de la carretera aumenta constantemente con la proximidad al ala; cuya interpretación es que la densidad del aire decrece constantemente a medida que la superficie del ala se halla más cerca. Así, en presencia de este gradiente de densidad, todo rayo que atraviese la zona contigua al ala lo hará refractándose continuamente y, por tanto, siguiendo un trayecto curvo [*véase la figura 3*]. Un rayo cuyo origen esté próximo al codo ilusorio hace un recorrido corto por dentro de la zona y se flexiona poco; un rayo procedente de la porción de la carretera más alejada penetra más en la zona y, por ello, se curva más. Esta desviación no uniforme de los rayos produce el despla-



1. Ilusión de acodamiento de una carretera

zamiento no uniforme de la carretera entre el codo y el ala.

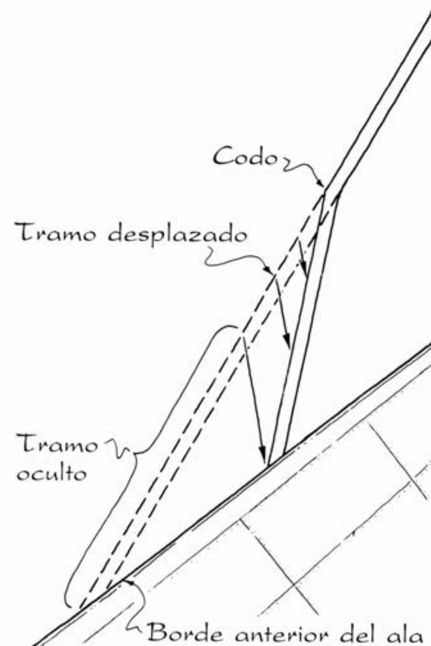
Sentado inmediatamente detrás de un ala y mirando por encima de ésta, puedo observar una ilusión emparentada con la anterior. Para ello, elijo un edificio de gran tamaño en el panorama que se aproxima y sigo mirándolo mientras parece ir acercándose al ala. Cuando se encuentra a punto de desaparecer debajo de ésta, se desfigura repentinamente y parece fluir hacia ella, desvaneciéndose un poco antes de lo que "debería" [*véase la figura 4*]. Elevando la cabeza para recuperar la vista del edificio, puedo hacer que el efecto se repita. Me preguntaba en un comienzo si lo que veía era sólo una confusa combinación de mi visión directa del edificio y una reflexión fugaz del mismo en el borde anterior del ala. Lo comprobé elevando gradualmente la cabeza y manteniendo así el edificio en el borde, con lo cual inmovilizaba brevemente la escena para estudiarla. No había reflexión: la imagen del edificio se desfiguraba, como estirándose hacia el ala.

La desfiguración debíase al mismo juego de refracciones que acoda la carretera de Wood. Cuando la parte inferior de la imagen del edificio se acercaba al ala, se hundía repentinamente ante mi vista porque los rayos de luz procedentes de ella se refractaban, para seguir un trayecto curvo provocado por el gradiente de densidad contiguo a la cara superior del ala. Durante un instante, la imagen del edificio se alargaba cual si fuera vidrio fundido. Cuando desaparecía también la parte superior de la imagen, el edificio entero se esfumaba rápidamente antes de lo que debiera, porque sus rayos se curvaban al atravesar el gradiente de densidad. Diríase que el ala, convertida en mastodóntica aspiradora, se había tragado el edificio.

Ahora bien, ¿por qué el ala se nos ofrece sin desfigurar? Al fin y al cabo, cuando la miramos, también interceptamos rayos que han atravesado el gradiente de densidad. Si no se observan distorsiones es porque los rayos viajan, en el seno del gradiente de densidad, una distancia demasiado corta y bajo un ángulo demasiado empinado para que se curven apreciablemente. Lo que no deja de tener su cara tranquilizadora: si las alas de los aviones se distorsionaran mucho, los viajes resultarían más inquietantes de lo que ya son.

Propone Wood otro modo en que la refracción podría alterar los objetos que se ven por encima del ala. Aunque la mayoría de los aviones de pasajeros vuelan a unas velocidades inferiores a la del sonido, la corriente de aire que roza la cara superior del ala puede rebasar esa velocidad. Cuando así ocurre, se forma un frente de onda de choque que se alza hasta uno o dos metros por encima del ala. Este frente se asemeja a un tabique estrecho, transparente y poroso que se extendiera de punta a cabo, a lo largo del ala, o bien formando varios tramos cortos. La densidad del aire es baja delante del frente y más alta por detrás. Un frente de onda de choque no es visible; en definitiva, se trata sólo de aire. Sugiere Wood, empero, que su presencia podría adivinarse porque, bajo ciertas condiciones, la luz solar que refracta proyecta una banda oscura sobre el ala.

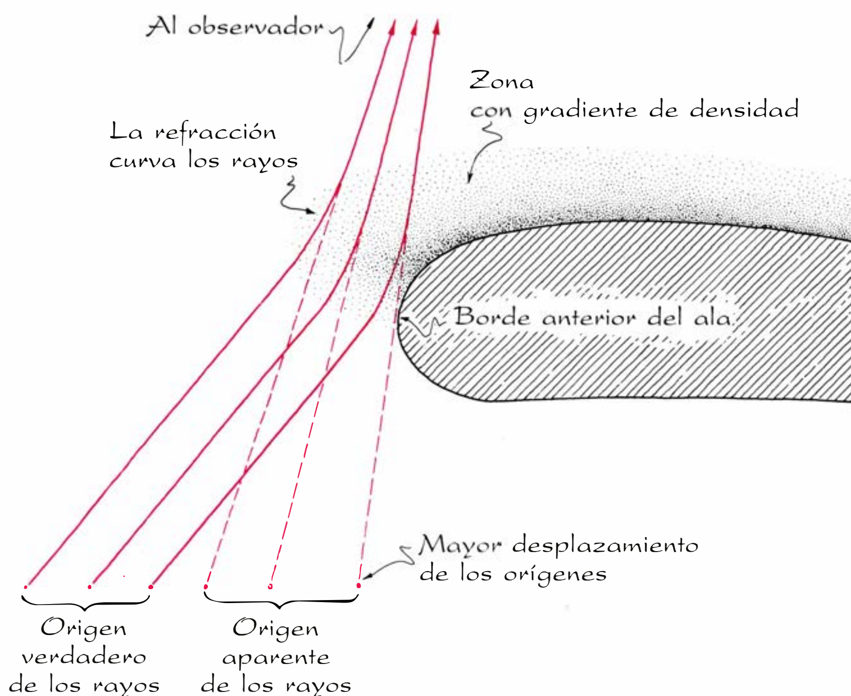
En 1983, Anthony Hewish, de la Universidad de Cambridge, informó independientemente sobre la observación de una de tales bandas. Ello tuvo lugar durante un vuelo realizado a gran altitud en un Boeing 727, con el sol a unos 25 grados sobre el extremo del ala. La banda discurría a lo largo de la mayor parte de su longitud y su anchura era de uno o dos centímetros (según la comparación que hizo con los remaches del ala). Detrás mismo de esa banda oscura, aparecía otra más estrecha y luminosa. Ambas se veían agitadas por una turbulencia suave; a veces aparecían bandas múltiples. Al descender y disminuir de velocidad el aparato, el conjunto se deslizó hacia la parte anterior del ala, perdió intensidad, se estrechó y desapareció. Diríase, pues,



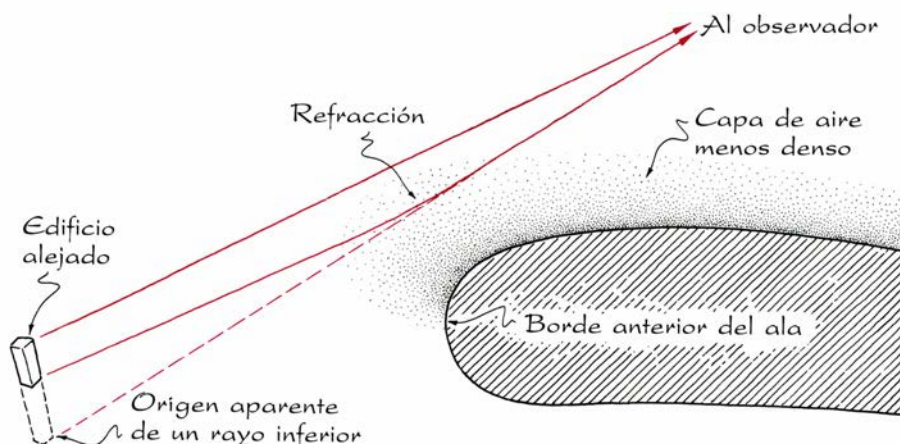
2. Vista ampliada de la ilusión de la carretera

que la disminución de la velocidad del aire sobre el ala redujo y eliminó el frente de onda de choque que creaba las bandas.

¿Cómo se formaron las bandas de Hewish? Consideremos un rayo solar que incida en la superficie delantera del frente de onda de choque bajo un ángulo oblicuo [*véase la figura 5*]. Como el sol está a 25 grados sobre el extremo del ala, el rayo se hallará inclinado hacia abajo. Cuando atraviese el frente, se refractará ligeramente hacia arriba



3. Refracción a través de un gradiente de densidad



4. Hundimiento aparente de un edificio

(y también apartándose un poco del fuselaje), de tal modo que llegará al ala algo más cerca del borde de ataque (y también algo más hacia el exterior del ala) que en ausencia de onda de choque. El punto del ala iluminado por el rayo refractado aparecerá brillante; oscuro, el punto al que de por sí hubiera ido a parar el rayo. Si se desvían de ese modo un sinnúmero de rayos a lo largo del frente, los puntos brillantes formarán una banda luminosa; los puntos oscuros, una banda oscura. Podrían asimismo generarse bandas si los rayos solares incidieran en el reverso del frente y se desviaran entonces hacia el borde de ataque del ala.

Esta explicación, aunque plausible, adolece de un fallo: pasa por alto la posibilidad de que los puntos que debieran estar oscuros se encuentren iluminados por otros rayos que pasan por otros puntos del frente algo más bajos. Para que se formen bandas luminosas y bandas oscuras, el frente de choque debe ser curvo o poseer un gradiente de densidad muy acusado de un lado a otro de su escasa anchura. En ambos casos, los rayos focalizarán como en una lente y sobre el ala caerá entonces una banda luminosa. La banda oscura constituye así una franja del ala a la que el enfoque impide que lleguen rayos.

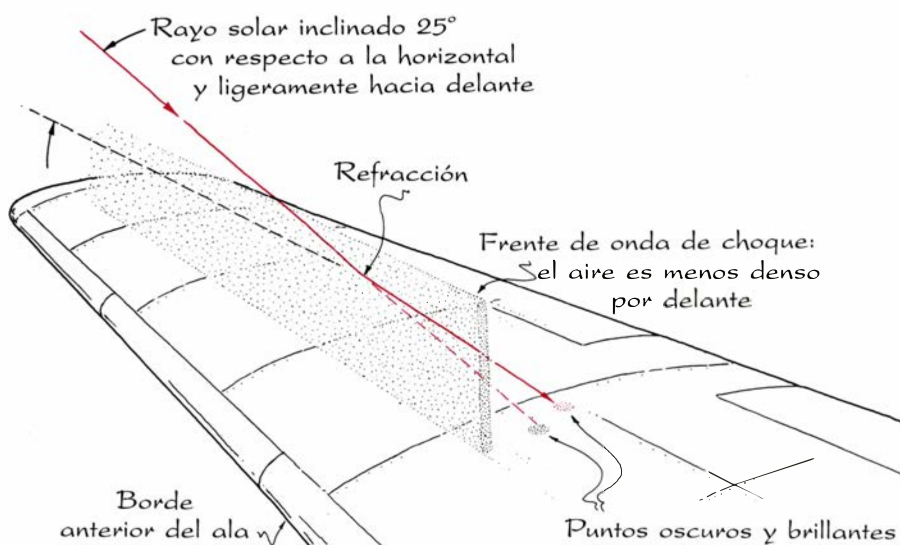
Con empeño, y durante largo tiempo, estuve buscando tales bandas en las alas de los aviones. No me acompañó la suerte. Pero las vi terminado el primer borrador de este artículo. Fue al día siguiente. Me encontraba sentado muy por delante de un ala y el avión volaba por encima de los 11.500 metros. El sol brillaba delante del ala. Al volver la vista hacia ésta, observé una extraña línea. Creí que se trataba únicamente del borde de una de las chapas metálicas que forman el ala, pero luego vi que bailoteaba un poco cuando el ala temblaba con la turbulencia. ¿Se debía aquella línea a un frente de onda de choque? De pronto, el piloto ladeó el avión, elevando ese ala y girándonos de tal modo que el sol quedó a unos 25 grados sobre el extremo del ala. La línea se abrió en bandas luminosas y oscuras perfectamente nítidas. Mi excitación, incontenida, debió llamar la atención de mis compañeros de pasaje.

Cuando el aparato se puso horizontal, el sol seguía situado sobre el extremo del ala, pero a un ángulo mayor y las bandas se veían menos nítidas. Mientras las estuve contemplando durante la media hora siguiente, la dirección del vuelo fue cambiando gradualmente y el sol acabó situado más o menos detrás de las alas, con lo que las bandas se fueron haciendo borrosas hasta terminar por desvanecerse.

Esta inesperada experiencia me ayudó a comprender por qué las bandas son tan infrecuentes. Para que se formen, los rayos solares deben llegar casi rasantes al frente de onda de choque, pues sólo así sufrirán una desviación apreciable. Esto significa que el sol debe hallarse aproximadamente sobre el extremo del ala; el ángulo de elevación ideal parece ser de unos 25 grados, lo cual debe guardar relación con la manera en que el frente de choque se curva verticalmente. Cuando el sol se encuentra demasiado lejos por delante o por detrás del ala, o demasiado alto sobre el extremo del ala, las bandas no se forman o resultan excesivamente tenues para que un observador despreocupado repare en ellas.

La aparición de las bandas puede depender también de la temperatura del aire. Para que se forme un frente de onda de choque, es necesario que la velocidad del aire con respecto al ala que roza sea superior a la velocidad del sonido. Por ser, esta velocidad, menor cuanto más frío está el aire, quizá sólo los aviones que vuelen rápido en aire muy frío desarrollen en sus alas importantes frentes de onda de choque.

Descubrí recientemente otro extraño efecto óptico que venía causado por el frente de una onda de choque. Iba el avión casi vacío, lo que me permitió examinar el fenómeno desde varios asientos de ventanilla contiguos a un ala. Hallábame casualmente en el lado del aparato contrario al sol cuando advertí una banda vertical oscura próxima al borde de ataque del ala. Observé que, al mover la cabeza hacia adelante, la banda se desplazaba hacia el extremo del ala. La atribuí a cualquier imperfección de la ventanilla; pero, cuando pasé al asiento de ventanilla inme-



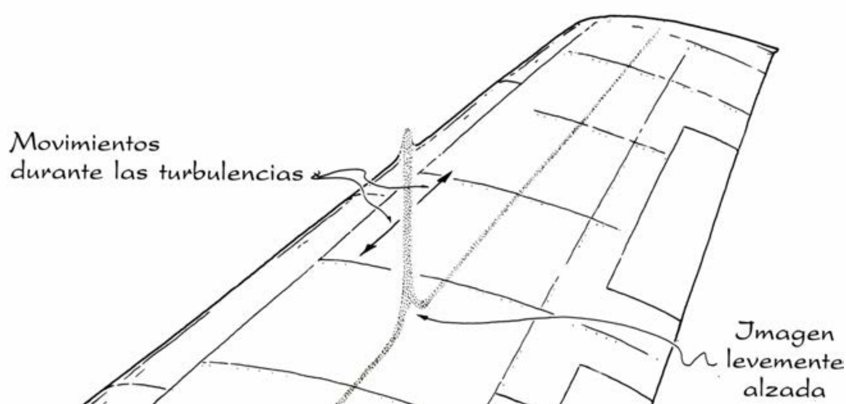
5. Refracción en un frente de onda de choque

diatamente anterior, volví a verla, esta vez en el extremo del ala. Su posición estaba vinculada al ángulo bajo el que observaba el ala. Todavía escéptico, la escudriñé atentamente con la cara comprimida contra la ventanilla. Cuando el avión entraba en alguna turbulencia suave que agitaba el ala, se ponía a bailar en vaivén. Puesto que mis ojos no se movían con respecto a la ventanilla, aquel baile tendría su origen en algo que ocurriera allá en el ala, y no en un defecto de la ventanilla.

En ambos asientos, y desde determinados algunos puntos, se veían dos bandas. Moviendo la cabeza, podía hacer que una de ellas adelantara a la otra. Poco a poco, empecé a comprender que me hallaba ante uno o dos frentes de onda de choque. Pero, ¿cómo formaban éstos aquellas bandas? Diferían de las observadas por Hewish y predichas por Wood en que caían de un lado a otro de mis ojos (y posiblemente la parte próxima del fuselaje) y no sobre el ala; desde cualquier asiento de ventanilla que no fuera uno de aquellos dos, no las veía. Además, al hallarme en el lado del aparato contrario al sol, no podían deberse a ningún efecto de refracción de la luz solar directa.

Ya en mi despacho, esbocé una explicación plausible para este segundo tipo de bandas. Supongamos que haya un frente de onda de choque horizontalmente curvo, con la convexidad dirigida hacia el borde de ataque del ala. Si miramos el ala casi tangencialmente a ese frente, interceptaremos rayos procedentes de rasgos del ala situados al otro lado del frente y que pueden refractarse al atravesarlo. Consideremos dos rasgos contiguos. Un rayo que proceda del detalle de la derecha quizá sufra sólo una pequeña refracción, puesto que penetra en el frente bajo un ángulo grande [*véase la figura 7*]. Un rayo que proceda del detalle situado un poco a la izquierda del anterior podría refractarse más porque, dada la curvatura del frente, penetra en éste bajo un ángulo más oblicuo.

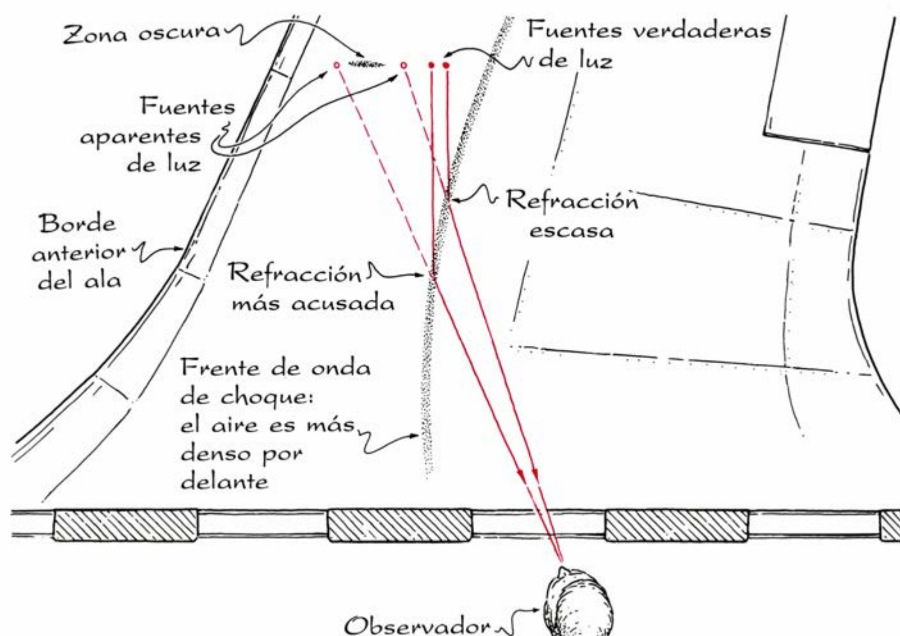
Entonces, cuando extrapolamos mentalmente esos rayos hacia atrás, el detalle izquierdo nos parecerá desplazado hacia la izquierda de su posición verdadera. El detalle derecho sufre un desplazamiento menor que el izquierdo. Y los rayos procedentes de la zona comprendida entre ambos aparecerán en nuestro campo visual repartidos sobre un ángulo mayor; de ahí que esa zona nos parezca oscura. Como el frente de onda de choque se eleva hasta una altura de uno o dos metros, lo que veremos en el ala será una banda oscura aproximadamente de la misma altura.



6. Extraña banda que a veces se observa en un ala

Este modelo parece explicar otros dos aspectos de mis observaciones. En la proximidad de aquella banda oscura, el borde de ataque y demás detalles del ala aparecían combados hacia arriba, por la obvia razón de que, cuando los rayos procedentes de esos detalles se remontaban atravesando el frente y penetraban luego en el aire más denso, se refractaban levemente hacia abajo, alejándose de la superficie del frente. Al extrapolarlos luego hacia atrás, caemos en la ilusión de creer que sus orígenes están algo más altos que en la realidad. Este modelo explica también por qué aquella banda oscura se movía cuando yo me movía. La banda era visible sólo cuando yo miraba casi tangencialmente a lo largo de la superficie del frente de onda de choque, con lo que interceptaba rayos que penetraban bajo ángulos oblicuos en el mismo y que, por tanto, sufrían una refracción perceptible; al mirar al frente de onda de choque bajo otros ángulos, intervenían nuevos rayos que se refractaban poquísimo. Al mover la cabeza hacia adelante, y a causa de la curvatura horizontal del frente, el lugar de éste donde mi visual era casi tangente se desplazaba hacia el extremo del ala; en consecuencia, la banda oscura hacía lo mismo.

La próxima vez que el lector viaje sentado en el lado sombreado del avión, puede fijarse en la sombra de éste poco después del despegue. Al principio, la sombra es grande, pero parece empequeñecerse constantemente durante el ascenso. Ese empequeñecimiento es una ilusión. Puesto que la sombra la configuran rayos solares casi paralelos, su tamaño debe ser el mismo cualquiera que sea la distancia



7. Vista en planta del frente de una onda de choque

del avión al suelo. (Los rayos no son exactamente paralelos, puesto que el sol es un disco, y no un punto, en nuestro campo visual, pero pasaremos por alto ese detalle.)

La sombra parece encogerse durante el ascenso del avión simplemente porque su amplitud angular decrece con la distancia. Cuando el ángulo se hace demasiado pequeño y la sombra demasiado tenue, ésta desaparece. Podríamos volver a verla si volamos por encima de una nube que no esté muy por debajo del avión. Recientemente, tuve ocasión de volar por encima de un grupo de nubes esparcidas a diferentes alturas por debajo del avión. Mientras la distancia que me separaba de las nubes variaba con celeridad, el tamaño aparente de la sombra del avión fluctuaba sin orden ni concierto.

Durante los últimos años, Gordon Lundskow, de Rochester (Minnesota), y Robert T. Chilcoat, de la Universidad estatal de Nueva York en Siracusa, han descrito un extraño fenómeno que, a veces, puede observarse en el "punto de sombra" de un avión. Gordon Lundskow había estado observando la sombra proyectada en el suelo hasta que la misma desapareció, cuando el aparato hubo subido más de 6000 metros. Entonces, en el sitio de la sombra, apareció un punto brillante. Chilcoat observó una mancha brillante similar que viajaba por el terreno, permaneciendo siempre (igual que la sombra) diametralmente opuesta al sol. A veces puede que veamos parte de ese brillo aunque la sombra esté presente; en este caso, el brillo la rodea.

El brillo del punto de sombra, y junto al mismo, recibe el nombre de heiligenschein (palabra alemana que significa *aureola*). Sus causas son diversas, pero en todos los casos hay algo en el suelo que difunde la luz solar devolviéndola en la dirección general del sol. Así, cuando miramos el punto de sombra o cerca de éste, interceptamos parte de ese retorno luminoso.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SHOCK-WAVE PHOTOGRAPHY IN TUNNEL AND IN FLIGHT. F. E. Lamplough en *Aircraft Engineering*, vol. 23, n.º 266, págs. 94-103; abril de 1951.

SCIENCE FROM YOUR AIRPLANE WINDOW. Elizabeth A. Wood. Dover Publications, Inc., 1975.

SUBSONIC FLOW. Milton Van Dyke en *An Album of Fluid Motion*. The Parabolic Press, 1982.

IN-FLIGHT MOVIES. A. Hewish en *Nature*, vol. 306, n.º 5939, page 188; 10 de noviembre de 1983.

Juegos de ordenador

Laberintos tridimensionales de ayer y hoy, visibles y huecos

A. K. Dewdney

"... un laberinto construido por Dédalo, de traza y concepción tan ingeniosa, que los encerrados en él no podían en forma alguna hallar sin ayuda el camino de salida."

—de la *Mitología de Bulfinch*

Casi todos los laberintos son bidimensionales, por lo que, mirándolos desde lo alto, podemos desentrañar la vía de salida a través de sus intrincadas vueltas y revueltas. En cambio, no es posible ver en planta (por así decirlo) los laberintos tridimensionales, pues los niveles superiores ocultan los inferiores. No tenemos más alternativa que ir a tientas —sea literal o figurativamente— a través de sus complejos pasadizos.

Entre los laberintos tridimensionales los hay nuevos y viejos. A tenor de su legendaria dificultad, el laberinto de Dédalo, de la antigüedad clásica, tuvo que ser tridimensional. Su tenebrosa oscuridad nos prestará marco adecuado para explorar las técnicas de resolución de laberintos, sin olvidar una generalización de la famosa regla de giro a la derecha, tan útil para laberintos bidimensionales. Por lo que a laberintos modernos se refiere, tenemos los construidos por M. Oskar van Deventer que, además de tridimensionales, ¡son invisibles! Suscitan un fascinante problema de reconstrucción, a saber: ¿en qué casos pueden tres laberintos bidimensionales definir un único laberinto tridimensional?

Dédalo construyó su notable laberinto para Minos, poderoso rey de Creta. Mas el rey no lo había destinado a fines recreativos: el laberinto servía para confinar siete muchachos y siete doncellas que cada año Atenas había de enviar como tributo. Por mucha que fuera su inteligencia, de nada les serviría a las infelices víctimas que se arrastraban por la lóbrega humedad de aquellos pasadizos, tratando ansiosos de hallar una salida. Y no era eso lo peor: en el laberinto moraba una criatura horrenda y feroz, el Minotauro. Con cuerpo humano y cabeza de toro, devoraba los infortunados jóvenes atenienses atrapados en la estructura.

Sólo Teseo, fabuloso héroe griego, resolvió el laberinto, amén de dar muerte al Minotauro. Ató al exterior un cordel que le proporcionó la hija del rey (secretamente enamorada de él, claro está) y fue desenrollando el hilo al tiempo que exploraba los pasadizos en busca del Minotauro. Muerto el monstruo, para escapar del laberinto le bastó dejarse guiar por el hilo.

¿Qué hubiera sucedido si Teseo, distraído, no hubiera asegurado el hilo antes de penetrar en el laberinto? ¿Habría escapado de algún otro modo? Una opción consistiría en atar el hilo al cadáver del Minotauro antes de partir en busca de la salida. Cuando menos, el hilo le permitiría retornar al punto de partida (los restos del monstruo) tras cada infructuosa exploración del artero laberinto de Dédalo. Pero el hilo solo no le garantizaría el final feliz. ¿Cómo recordaría Teseo los corredores que había explorado ya?

Ello depende de si la memoria de Teseo fuera interna o externa. De ser interna, le bastaría recordar hacia qué lado giró cada vez que se encontró una bifurcación. De ser externa, podría colocar algún símbolo o marca en cada cruce, como registro de su paso. Personalmente, juzgo más verosímil la segunda opción, por lo que proveeremos a Teseo de unas cuantas monedas de un dracma.

Cada vez que Teseo llegase a la confluencia de tres o más pasadizos, examinaría el suelo de la entrada de cada uno. De encontrarse una moneda en la entrada de alguno, no penetraría en él. En caso contrario, se adentraría en él para explorarlo. Tan pronto entrase depositaría una moneda en el suelo, bien visible desde el cruce de los corredores. Mal vería Teseo las monedas, objetará algún lector, en la proclamada oscuridad del laberinto. Parece razonable, pues, consentirle también alguna clase de antiguo artilugio para hacer fuego; por ejemplo, un mechero.

Al ir siguiendo el procedimiento recién esbozado, Teseo se vería obligado algunas veces a retroceder. Tendría que desandar sus pasos al tomar un callejón sin salida o al llegar a un cruce cuyos caminos estuvieran ya marcados con monedas. ¿Cabe que, al retroceder, Teseo sólo encontrase entradas no utilizables? Con otras palabras, ¿podría darse el caso de que quedase atrapado en un bucle infinito? En beneficio de quienes gustan de pensar por sí mismos, dejaré la pregunta sin responder. Baste decir que el método básico que acabo de esbozar se utiliza ampliamente en la informática de nuestros días para la exploración de estructuras de datos. La del tipo de la anterior recibe el nombre de búsqueda a la profundidad del primer nivel.

Puede que nuestro intrépido héroe no tuviera monedas, o peor todavía, que careciera de encendedor. ¿Cómo resolver entonces el laberinto? Por fortuna, existe un método de escape que no requiere memoria externa. Además, al ponerlo en práctica, Teseo no habría tenido que esforzar su cerebro más que al efectuar una búsqueda de profundidad uno. Llamo a este método "triple regla de la mano derecha".

De ordinario, los laberintos bidimensionales pueden resolverse por la regla de la derecha: al penetrar en el laberinto nos mantenemos en contacto continuo con la pared de la derecha, por muchas vueltas y revueltas que den los pasadizos. En las bifurcaciones se toma siempre el corredor de la derecha. Si el pasadizo es ciego, sin salida, sencillamente damos la vuelta, pero manteniéndonos siempre junto a la pared de la derecha.

Actuando así, inevitablemente saldremos. Los perspicaces lectores se habrán fijado en que no he dicho explícitamente que vayamos a salir por el punto deseado. Cuando la salida del la-

berinto se encuentra en el centro (como sucede en tantos ejercicios con lápiz y papel), es muy posible que tras una fatigosa aplicación de la regla de la mano derecha se acabe saliendo por donde se entró. Pero es forzoso que se retorne al exterior. La razón es muy sencilla: respetando la regla tenemos garantizado que jamás reandaremos nuestros pasos. Dado que jamás se recorre dos veces ninguna parte de la pared que define los corredores del laberinto, se deduce que, tarde o temprano la pared se "agotará", por así decirlo, y daremos con una salida. (La excepción es el caso de que las paredes del laberinto formen un circuito completamente cerrado, pero en esa situación, tampoco la pared tendría un hueco por donde entrar.)

Puede aplicarse una variante de la regla de la mano derecha para resolver los laberintos tridimensionales, incluida la trampa cruel del rey Minos. Para facilitar las cosas, supondré que todos sus pasadizos tienen sección transversal cuadrada y son perfectamente rectos, salvo en los recodos, que son siempre de 90 grados. Supondré además que todos corren exactamente de este a oeste, de norte a sur, o de arriba abajo, y que son, por consiguiente, mutuamente perpendiculares. Daré también por supuesto que en los encuentros de los túneles solamente se forman dos tipos de uniones: una bifurcación en T y un vértice trífido.

Permítame ahora el lector que le lleve a tientas por los pasadizos, para mejor explicarle el funcionamiento de la triple regla de la derecha. No es preciso giroscopio alguno; la gravedad nos dice qué lado es arriba y cuál abajo. Las otras cuatro direcciones se recuerdan sin más que llevar la cuenta de nuestros giros al recorrer el laberinto tridimensional. Si entramos en el laberinto mirando hacia el este, un giro a la derecha nos dejará en dirección sur, otro más a la derecha nos hará marchar en dirección oeste, etcétera.

En el caso de bifurcaciones en T, antes de aplicar la triple regla de la derecha es preciso identificar qué plano la contiene, pues cada uno de los tres planos posibles tiene asignada una "mano" específica [*véase la figura 1*]. Imaginemos un reloj de agujas adosado a una superficie paralela a la del plano de la T de que se trate. Decidimos arbitrariamente que las manecillas de ese reloj giran "a derechas". Al ir recorriendo el laberinto, cada vez que debamos girar, lo haremos sistemáticamente en ese sentido.

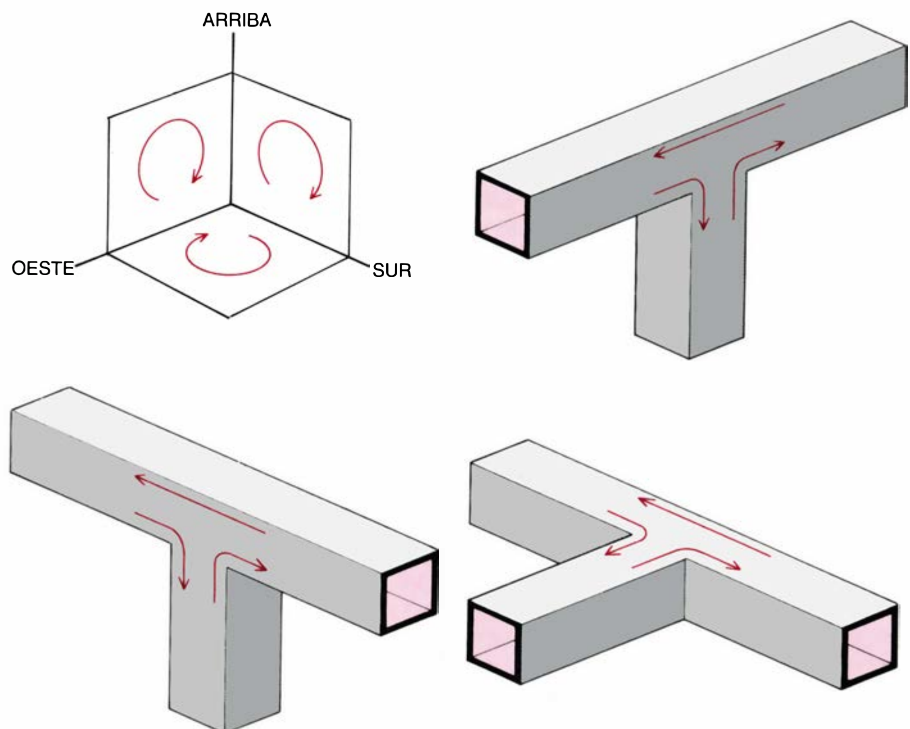
La regla debe modificarse ligeramente para el caso de los vértices de confluencia de tres pasadizos. (¿No será el Minotauro eso que brama a lo lejos?) Convengamos en que los pasadizos que van de arriba abajo tienen dirección 1, que las galerías norte-sur tienen dirección 2, y que los corredores de este a oeste tienen dirección 3. Avanzando en dirección 1, al llegar a un vértice triple es preciso salir por la dirección 2. Si se llega en dirección 2 debe seguirse por la 3. Incluso Teseo adivinaría que, llegando a la trifurcación en dirección 3, tendría que salir por la 1. Y eso es todo cuanto hay que decir sobre la triple regla de la derecha.

Las soluciones obtenidas con la triple regla anterior verifican un criterio general: no se recorrerá ningún pasadizo dos veces en la misma dirección. ¿Garantizará el éxito la triple regla de la derecha? Yo mantengo que sí, pero sólo cuando la entrada y la salida estén conectadas por un único camino. Si el laberinto admite más de una solución, propongo, más modestamente, que se acabará emergiendo por la salida prevista o por la entrada.

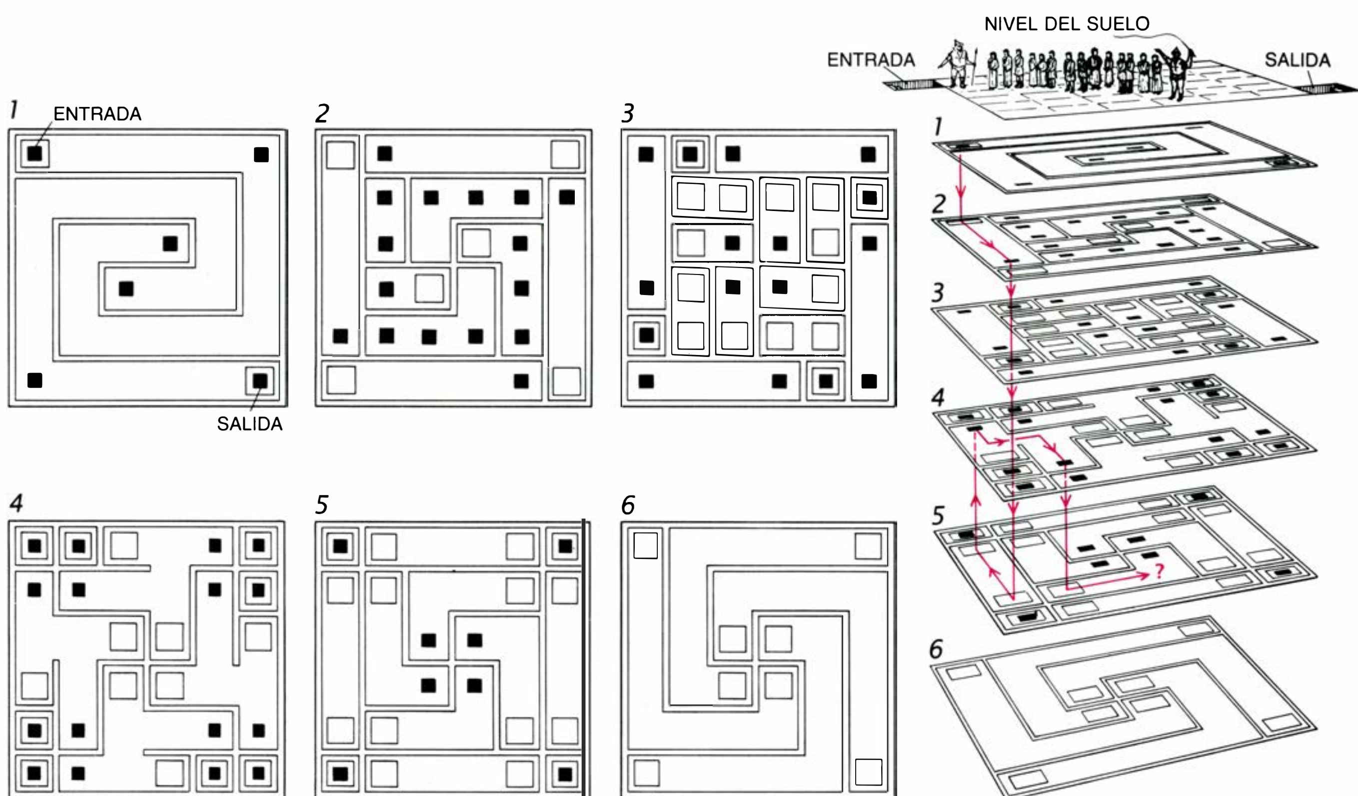
Por supuesto, nada garantiza que Teseo logre salir del laberinto si no aplica la triple regla hasta despachar al Minotauro. Pero si la obedeció nada más adentrarse en el laberinto, y suponiendo que el combate no le hiciera perder la memoria, sí retornaría a la luz del día, convertido en héroe. ¡A Teseo poco le importaría emerger por la entrada o por la salida!

Teniendo presentes estas reglas, los lectores quizá se sientan ya listos para abordar la resolución de un laberinto tridimensional. Tras extensa investigación de la materia, ofrezco nada menos que una reconstrucción del laberinto original de Dédalo, que se exhibe en la figura 2. Sus seis niveles son subterráneos. El más alto (nivel 1) yace justamente debajo de las pesadas losas de piedra del patio del rey Minos. Faltan dos de las losas, que dejan ver sendos pozos. El lector es conducido al interior del laberinto por un fornido esbirro del rey Minos, y puede que a la postre emerja por el otro pozo, pues tal es la salida del laberinto. Entre la entrada y la salida se ocultan no pocas aventuras y desventuras.

Los seis niveles del laberinto reflejan el origen de su diseño: un cubo de seis casillas de lado. Todas las galerías horizontales aparecen como suelen trazarse los mapas de laberintos bidimensionales. Los pozos, o pasadizos verticales, están representados por cuadrados. Los émulos de Teseo pueden pasar de uno a otro nivel deslizándose por alguno de los pozos representados por un cuadrado negro; saldrán a la casilla correspondiente del nivel inferior, donde en el mapa encontrarán un recuadro blanco mayor, el pozo a través del cual



1. La triple regla de la mano derecha para laberintos tridimensionales



*2. Reconstrucción del laberinto de Dédalo y un posible recorrido por su interior (*color*)*

llegaron. Por supuesto, cuando el lector quiera subir tendrá que dirigirse al cuadrado blanco más cercano. Aparecen también cuadrados negros inscritos en otros blancos. Ello no significa otra cosa que desde esa especial posición del laberinto tanto se puede subir como bajar.

Varios caminos conducen de la entrada a la salida por el interior del laberinto. Algunos lectores se contentarán con descubrir uno cualquiera; otros querrán determinar la solución más corta, medida por el número de casillas atravesadas. Para que el viaje resulte un poco más aventurado, he añadido al laberinto un Minotauro. Se encuentra apostado en el único punto donde forzosamente interceptará a cualquier inocente explorador. Citaré en una sección posterior los cinco primeros lectores que me informen de qué lugar se trata.

Entre los laberintos modernos destacan dos tipos especialmente. El primero es visible; el segundo, invisible. El laberinto visible es un cubo de plástico transparente que contiene una serie de paredes perforadas que se intersecan. Por los pasadizos que delimitan las paredes corre una bolita de acero. Para resolver el laberinto, éste se inclina y manipula hasta que la bola llega a la "meta" deseada. Hace diez años esos ingenios gozaban de gran popularidad y se encontraban en muchas tiendas de juegos. Existe hoy uno similar, el Laberinto de Miller, pero sólo en alguna tienda especializada.

El otro tipo de laberinto moderno procede del taller que van Deventer tiene en Voorburg, Holanda. Van Deventer llama a sus obras *holle doolhof*, laberintos huecos. Terminología perfectamente razonable: ¡sus laberintos son cajas de madera que no contienen absolutamente nada! No hay en su interior pasadizo ni pared alguna; sin embargo, contienen un verdadero laberinto tridimensional.

El secreto estriba en las caras de la caja. Son éstas sendos "laberintos de control" bidimensionales, superficies de madera en las que se han recortado ranuras a propósito. Un cursor, compuesto por tres listones de madera perpendiculares entre sí, define la posición que ocupamos en el interior del laberinto hueco. Los listones son pasadores que atraviesan la caja desde una cara hasta la opuesta y se deslizan por las ranuras del laberinto de control de cada costado. Sobra decir que los laberintos de control de cada par de caras opuestas son idénticos. De esta forma, van Deventer genera laberintos tridimensionales a partir de tres pares de laberintos planos.

En el sencillo ejemplo de la figura 3 se empieza con el cursor en una de las esquinas de la caja; se trata de manipularlo hasta llevarlo al rincón diagonalmente opuesto. Los vástagos pueden introducirse más o menos en la caja, moviéndose automáticamente los otros dos vástagos (si ello es posible) a lo largo de las rendijas de sus respectivos laberintos de control. Parecería que para resolver un laberinto hueco basta con resolver los tres laberintos de control. Pero no es así. Los de control se resuelven con facilidad, pero el laberinto hueco es francamente difícil.

La dificultad estriba en que los movimientos que resultan posibles en uno de los laberintos de control pueden quedar bloqueados por otro. Además, no resulta obvio en qué orden debe empujarse o tirarse de los tres vástagos. Una posición dada del cursor puede permitir varios movimientos. Para resolver el laberinto podríamos cerrar los ojos e ir "palpando" el camino a su través. El laberinto invisible encerrado en la caja adquiere de este modo una realidad nueva, táctil.

En principio, podría visualizarse el laberinto invisible proyectando las ranuras de tres laberintos de control mutuamente adyacentes a través de un cubo macizo de un material fácil de vaciar. Valiéndonos de los laberintos de control a modo de plantillas de marquetería, al terminar el calado habríamos recortado del sólido todo el ma-

terial no correspondiente al laberinto. Como es obvio, los laberintos de control deben presentar la misma orientación que tenían en el laberinto de van Deventer.

Puesto que el proceso es en gran medida imaginario, he decidido equiparme con una sierra de láser para realizarlo. Emplazando la sierra directamente sobre una de las caras del cubo, me basta reseguir las líneas de tracería y practicar un corte perpendicular al sólido al ir avanzando. Lista la talla, con toda delicadeza separo del cubo el material sobrante, que se desliza y deja la forma tridimensional correspondiente a las rendijas del laberinto de control. Tras repetir el proceso para las otras dos caras, el sólido que subsiste constituye, efectivamente, una pieza maciza en "negativo" del laberinto de van Deventer. Yo lo llamo vaciado proyectivo. Los lectores hallarán en la figura 3 la plasmación de uno de ellos.

Dos cuestiones fascinantes giran en torno a los vaciados proyectivos. Primero, ¿en qué casos se engendrará, a partir de tres laberintos bidimensionales, un vaciado proyectivo de un laberinto tridimensional viable? Segundo, ¿en qué casos un vaciado proyectivo producirá tres proyecciones que sean laberintos bidimensionales viables? Sería preciso definir el concepto de "laberinto viable". Dícese del laberinto cuyos pasadizos tienen todos anchura unidad y en el que existe un camino continuo que conecta la posición "de partida" con la posición "meta". (Propongo que los laberintos tridimensionales viables que resultan de tres laberintos de control bidimensionales se denominen laberintos de van Deventer.) Fácilmente se imaginan otras condiciones, pero éstas convienen a la estética del buen diseño de laberintos. La definición propuesta servirá para empezar.

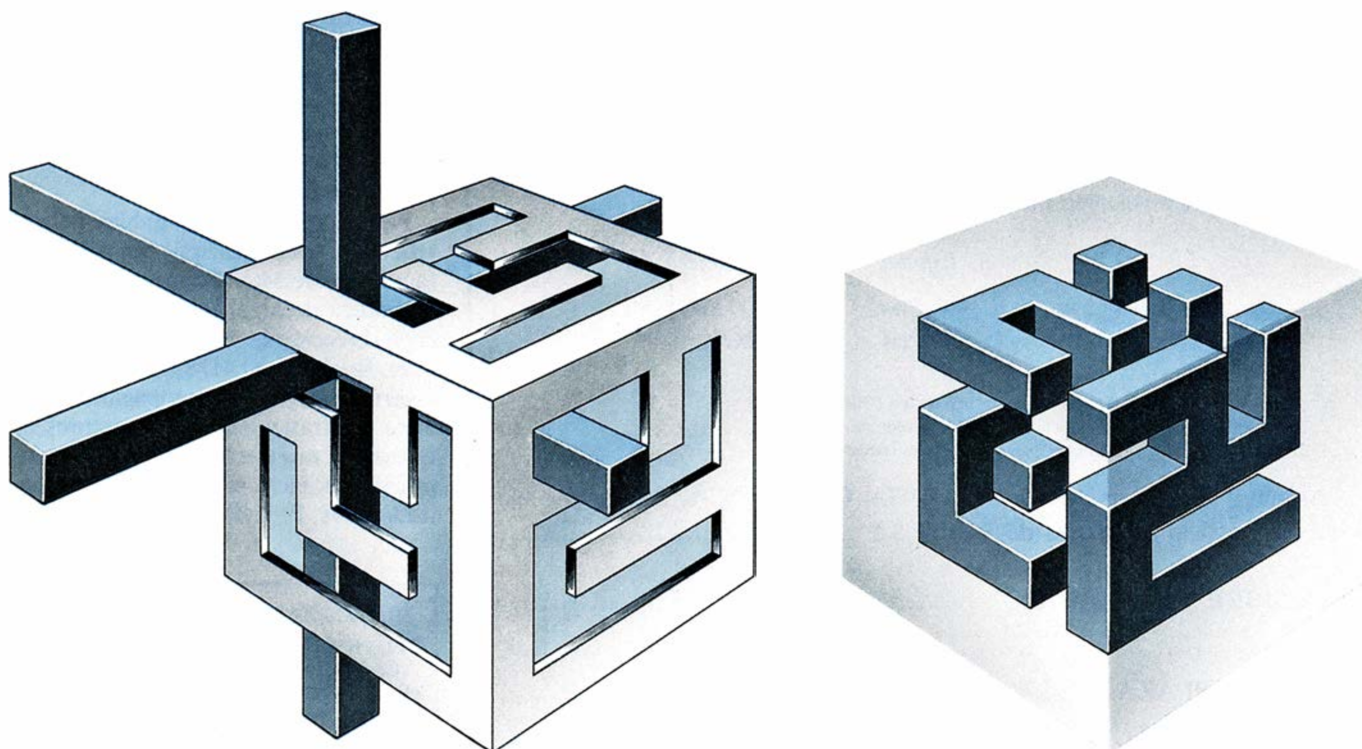
Incluso experimentando con laberintos de control muy sencillos nos sorprenderá el resultado de pasar a las tres dimensiones. Podemos, por ejemplo, construir un laberinto de van Deventer a partir de laberintos de control bastante triviales: matrices celulares de 3 por 3 en las que se han eliminado algunas casillas adyacentes. Quizá plazca a los lectores comenzar con tres laberintos de control de 3 por 3, provistos de ranuras en forma de L dispuestas en diversas orientaciones. ¿Cuántas de estas combinaciones dan laberintos de van Deventer?

Concierne la otra cuestión al aspecto contrario: ¿en qué casos produce la proyección de un laberinto tridimensional tres laberintos de control viables? Ambas cuestiones revisten importancia práctica para van Deventer. De tener la respuesta de cualquiera de ellas, el proceso de diseño de laberintos huecos se le simplificaría notablemente. El propio van Deventer confiesa haber dedicado muchas horas de marquetería a sus esfuerzos por dar con laberintos más complicados. Los lectores que deseen opinar sobre la cuestión pueden escribir directamente a van Deventer a la dirección siguiente: p.a. Dr. Beguinlaan 44, 2272 AK Voorburg, Holanda. Una respuesta creativa podría muy bien animarnos a que demos un repaso a los laberintos de van Deventer en esta sección.

El pasado mes de julio apareció en esta sección el profesor invisible para trazar algunos ejemplos clásicos tomados entre la infinita variedad de curvas algebraicas y trigonométricas. Entre los muchos lectores que conocían ya al profesor, algunos han aportado interesantes comentarios.

Abe Achkinazi, de Bell, California, ha sugerido que se fije una cita entre el profesor y Lucy, la trazadora gráfica de color Hewlett Packard del laboratorio de matemáticas de la Universidad estatal de California en Northridge. Al profesor le encantarían las curvas de Lissajous que dibuja Lucy. Achkinazi tiene un programa que traza rectas entre los puntos homólogos de un par de esas figuras. De este modo, Lucy produce curvas extravagantes revestidas de una especie de velo "moiré".

Tom Dorn, de Vancouver, Columbia Británica, Canadá, nos recomienda su programa ABEJORRO. En él intervienen las siguientes ecuaciones paramétricas, donde la variable *a* puede ajustarse a



3. Un sencillo laberinto de van Deventer (izquierda) *y su vaciado proyectivo* (derecha)

conveniencia:

$$x = 2\ \mathrm{sen}(at)$$
$$y = e^{t\ \mathrm{sen}\ t}.$$

Temple H. Fay, de la Universidad de Missisippi del Sur, opina que las curvas en polares, definidas en función de un radio vector y un ángulo, (r,θ), en lugar de las abscisa y ordenada cartesianas (x,y), son sumamente útiles en la enseñanza del cálculo. El profesor dibuja una mariposa valiéndose de las funciones seno, coseno y exponencial:

$$r = e^{\cos\theta} - 2\cos(4\theta) + \mathrm{sen}^5(\theta/12).$$

El campo de la representación de curvas es objeto de acelerado interés comercial o cuasi-comercial. Una avalancha de productos pretenden ayudar al aficionado trazador de la curvilínea complejidad. Por ejemplo, David E.-B. Kennedy, profesor de matemáticas de la escuela secundaria de Langley, Columbia Británica, es un entusiasta de la calculadora trazadora Casio fx-7000G. Esa maravilla, que cabe en la palma de la mano, muestra gráficas en miniatura de casi todas las funciones en una pantalla que mide unos 5 centímetros de anchura por algo menos de 4 de altura.

SPIA es un programa de matemáticas, al parecer de amplio alcance, que permite a los usuarios construir y representar gráficamente fórmulas de cualquier tipo. Además, dispone de operaciones especiales, como la transformación de Fourier, para quienes desean comprender el procesado de señales. Los lectores interesados en él pueden escribir a Moonshadow Software, P.O. Box 5974, Baltimore, Md. 21208, Estados Unidos.

Finalmente, he oído hablar de una tenebrosa organización llamada MAL (acrónimo de Math Algorithm Library, biblioteca de algoritmos matemáticos) cuya dirección es P.O. Box 531, Wynnum, Brisbane, Q 4178, Australia. Una divertida hojilla de propaganda promete MALtratamiento a los lectores interesados en MALfunciones. La MALpráctica es fácil, según el MALadministrador, Dr. P. ffyske Howden.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BULFINCH'S MYTHOLOGY. Thomas Bulfinch. Carlton House, 1936.

GÖDEL, ESCHER, BACH. Douglas R. Hofstadter. Tusquets; Barcelona, 1987.

TALLER Y LABORATORIO. Jearl Walker en *Investigación y Ciencia*, n.º 119, págs. 93-99; agosto de 1988.

Libros

Célula, detección de neutrinos y embriología del siglo XVIII

M.ª Pilar Sesma, Angel Morales y Luis Alonso

LA CÉLULA VIVA, por Christian de Duve. Prensa Científica; Barcelona, 1988.

Son muchos los libros de biología celular escritos hasta la fecha, especialmente en los últimos años; sin embargo, puede que en pocos el autor o autores hayan conseguido el lenguaje "vivo", adecuado para expresar los fenómenos vitales. Christian de Duve en *La célula viva* lo ha conseguido, hasta el punto de hacer al lector prácticamente "ver" –y no sólo vislumbrar– el mundo celular. Por ello, difícilmente puede encontrarse un título más adecuado para el contenido y la forma del libro.

Tal y como señala al autor en el prólogo, el libro recoge cuatro conferencias en la Universidad de Rockefeller en Nueva York, ante un auditorio de unos 500 alumnos de primer ciclo, por lo que puede ser un buen modelo para los que nos dedicamos a la enseñanza de la biología celular, que muchas veces comprobamos la tendencia de los alumnos a imaginar las células estáticas, sin vida, justo lo contrario de lo que queremos transmitir y, con frecuencia, no sabemos expresar.

Quizá la clave del "éxito" en la exposición sea la originalidad y acierto en el planteamiento docente: llevar a los oyentes –al lector en el caso del libro– "de excursión" por la célula. ¿A quién no le apasiona realizar una bonita excursión, visitando lugares desconocidos –de difícil acceso– a los que sólo puede llegar con la ayuda de un buen guía? Originalidad en el planteamiento, que se explica por la madurez e integridad científicas de una persona con muchos años de dedicación a la investigación y docencia, que es capaz de integrar los aspectos morfológicos, bioquímicos, genéticos y de biología molecular en la explicación de los fenómenos vitales.

El autor va "introduciendo" al lector en un mundo fascinante, convirtiéndole en protagonista de los hechos; algo así como el que lee una novela de aventuras sintiéndose el personaje principal. De esta forma, la única pena que queda al terminar el libro es no haber sido uno de esos 500 alumnos privilegiados que realizaron –de verdad– la excursión con De Duve.

Del prólogo llama la atención la amplísima relación de personas a las que agradece su colaboración y más todavía que, en primer lugar, lo haga a los 500 alumnos por "su respuesta entusiasta y sus preguntas incisivas". Ello pone de manifiesto el talante de un profesor que valora al auditorio en la justa medida.

Tras una breve recopilación histórica, con la iconografía bien seleccionada, y una exposición de lo que puede considerarse el concepto actualizado de la biología celular, el autor presenta sobre el "mapa" los tres itinerarios a realizar por los "exploradores celulares": alrededores y superficie de la célula, el vacuoma; citosol y orgánulos citoplasmáticos, y el núcleo.

No cabe duda de que la selección de los itinerarios, de las "paradas" en cada uno de ellos, e incluso de las "vueltas atrás", son uno de los cometidos más importantes de un buen guía para realizar con éxito una excursión. En este sentido, De Duve se nos muestra como el "jefe de expedición" a la vez seguro y valiente, bien experimentado, que inicia la "andadura" por aspectos de mayor incidencia morfológica –más fáciles de asimilar– y, poco a poco, va introduciendo al lector en cuestiones bioquímicas en el segundo itinerario, para llegar al complejo mundo de la biología molecular en el tercer itinerario relativo al núcleo.

La peculiaridad del método no resta precisión a la obra. Por el contrario, es asombroso comprobar cómo junto a los términos técnicos adecuados el autor siempre tiene recursos para encontrar símiles de la vida cotidiana, o de hechos conocidos por el lector, que le permitan comprender los términos. Diríase que De Duve ha puesto toda su imaginación al servicio del lector. Basta citar algunos de estos símiles: estructuras extracelulares conjuntivas comparadas a troncos y lianas de la selva virgen; proteínas de membrana a pasos levadizos de ciudades amuralladas; linfocitos *T* o *B* a la infantería y artillería del sistema inmunitario, respectivamente; moléculas de clorofila a antenas solares, etc.

Muchas de las comparaciones están ilustradas con dibujos o fotografías, lo que ayuda a los lectores menos imaginativos. En ocasiones, los símiles adquieren caracteres especialmente gráficos cargados de gracejo y poesía: "pirotecnia molecular" referida a las interacciones actina-miosina en presencia de iones Ca^{++}; "metamorfosis molecular", a la biografía de las proteínas desde su "cuna" hasta su degradación; "verdes mansiones de la vida", en el tema de los cloroplastos, etc.

La comprensión de los términos técnicos se ve facilitada, además, porque en la inmensa mayoría está detallada su significación etimológica, lo que representa una gran ayuda y aumenta el bagaje lingüístico del lector.

Todos los capítulos están salpicados de preguntas que dejan claro lo mucho que queda todavía por hacer, excitando el espíritu científico del lector. En muchos de ellos se incluyen cuestiones relativas a los posibles mecanismos evolutivos, tratados con la debida moderación ante las grandes limitaciones que ofrece el conocimiento real de estos procesos. La evolución es objeto de un apartado especial en el capítulo 18, en el que se analiza la cuestión del papel del azar y del diseño previo en el proceso evolutivo con la ponderación de un gran maestro, carente de prejuicios cientifistas.

Mención especial merecen los esquemas y dibujos que ilustran la obra. En ellos se encuentra el complemento ideal al texto. Si bien todos son espléndidos, sobresalen los relativos a las membranas, citoesqueleto, replicación, transcripción y traducción. Asimismo, cabe hacer notar la fidelidad de la versión española respecto a la original, manteniendo su mismo tono. Lo ha traducido un prestigioso bioquímico español: Esteban de Santiago.

El autor señala en el prólogo que no pretende escribir un libro de "texto". Sin embargo, ¡qué satisfechos quedaríamos los profesores, si nuestros alumnos adquirieran, junto con los conocimientos, "el sentimiento de admira-

ción" hacia la célula viva que este libro inspira! (M.P.S.)

LOW TEMPERATURE DETECTORS FOR NEUTRINOS AND DARK MATTER, Dirigido por K. Pretzl, N. Schmitz y L. Stodolsky. Springer; Berlín, 1987.

Se recogen en el presente volumen las comunicaciones presentadas a la Reunión que el Grupo Europeo de trabajo sobre dispositivos superconductores para la detección de neutrinos y materia obscura mantuvo en el castillo de Ringberg, Tegernsee, en los Alpes bávaros, en marzo de 1987. Se trata de la primera publicación dedicada específicamente a este tema, de gran actualidad e importancia, que interesa por igual a físicos de partículas y a astrofísicos, pero que, por sus peculiares características, incluye también a la física de bajas temperaturas y del estado sólido. Este carácter interdisciplinar del tema, y su consecuente variada fenomenología, hacen que este libro sea atractivo para un amplio sector de investigadores y estudiantes.

En los últimos años han cobrado gran interés algunos temas comunes a la física de partículas y a la astrofísica. El estudio de la naturaleza y propiedades del neutrino es un tema clásico de interés permanente desde su introducción por Pauli, como objeto teórico, hace algo más de cincuenta años, y desde su detección por Reines a finales de los años cincuenta. Recientemente, el posible carácter masivo del neutrino, sugerido o exigido por las denominadas teorías de gran unificación –que van más allá de nuestra descripción convencional de las interacciones elementales–, ha reavivado, si cabe, el interés por tan sutil y extraordinaria partícula, de la que quedan aún por develar algunos de sus aspectos fundamentales: por ejemplo, si tiene o no masa, si es o no antipartícula de sí misma o cuántos neutrinos diferentes –de distinta especie– hay, es decir, si sólo existen los tres que conocemos o hay alguno –o algunos– más. Si los neutrinos tienen masa, pueden entonces mezclarse los de una especie con los de otra y pueden oscilar reconvirtiéndose unos en otros en su devenir temporal, lo que tiene implicaciones fundamentales en astrofísica.

En efecto, el denominado problema de los neutrinos solares, o déficit de neutrinos electrónicos de origen solar detectados en la Tierra (según datos recogidos durante más de veinte años por Davis en su detector de la mina de Homestake, USA, y recientemente por Totsuka en el detector de la mina de Kamioka, Japón), podría resolverse con una elección adecuada de los parámetros de la oscilación entre neutrinos de distinta especie (la diferencia cuadrática de sus masas y el ángulo de mezcla), según sea la densidad del medio en el que se propagan y su energía. Estos ingredientes, felizmente introducidos por Mikeyev y Smirnov en su teoría de oscilaciones resonantes, puede de hecho explicar el mencionado déficit para valores de los parámetros que no contradicen otras predicciones convencionales, lo que supondría un refrendo de nuestras concepciones sobre el modelo solar y los procesos de generación de energía en el sol. Esta clásica interrelación entre la astrofísica y la física de partículas es sólo un ejemplo de sus intereses comunes.

El carácter masivo del neutrino tiene, en sí mismo, implicaciones fundamentales en nuestra concepción del universo, si, como indican algunas propuestas, el neutrino fuera un buen candidato a la materia obscura del universo. Por último, como es bien sabido, los neutrinos nos proporcionan información sobre los mecanismos de liberación energética en el interior de las estrellas y en particular de la termodinámica de su colapso. El singular acontecimiento reciente de la explosión de la supernova SN1987a y la información que sobre ella han proporcionado sus neutrinos, detectados en la Tierra en diversos laboratorios subterráneos (Kamioka, IMB, Mont Blanc y Baksan), o, a la inversa, la información que, por ejemplo, sobre la masa de los neutrinos puede inferirse de los espectros energético y temporal de los neutrinos procedentes de SN1987a, demuestra, con un ejemplo de actualidad, las fronteras comunes entre la astrofísica y física de partículas. Pues bien, a la detección del neutrino, mediante técnicas no convencionales, dedica, como veremos, el presente libro una parte de su contenido.

El otro gran tema de interés que justifica sobradamente los esfuerzos y trabajos recogidos en el libro es la materia obscura del universo y su posible detección. Existe hoy el consenso generalizado de que un 90 por ciento de la materia del universo no brilla, y hay acumuladas pruebas suficientes –a diversas escalas de magnitud de los componentes del universo– para aceptarlo como un hecho incuestionable. Esta materia gravitacional, que se llama obscura u oculta, que no emite luz, es muy probable que sea de origen no bariónico –es decir, materia no convencional– al menos en gran parte; y estaría formando halos galácticos compuestos por entes para los que existen candidatos de todo tipo, pero que serían vestigios de épocas pretéritas en la formación del universo, partículas con masa y de muy débil interacción (WIMP). Muchos de los candidatos aparecen de forma natural en las teorías de gran unificación, o en teorías supersimétricas (neutrinos pesados, partículas supersimétricas como *s*neutrinos, fotinos...). Es evidente que la detección de estos objetos tendría consecuencias trascendentales; por eso se asiste hoy a un intenso desarrollo de métodos y técnicas con tal fin. Dentro de ciertos esquemas de interacción y para ciertos tipos de candidatos, los detectores actuales, convencionales, en operación en instalaciones subterráneas (grandes detectores de neutrinos o dispositivos para detección de la desintegración del protón o incluso detectores convencionales del germanio de ultrabajo fondo), han permitido poner límites a las masas y acoplamientos de dichos candidatos a la materia obscura, pero no existe hoy por hoy ninguna prueba positiva y directa de su detección. La búsqueda de los componentes de esta materia obscura y otros fenómenos exóticos se encuentran obviamente en el límite de detectabilidad de los dispositivos actuales y es preciso la aportación de nuevas ideas, nuevas técnicas, algunas de las cuales –referentes al empleo de bajas temperaturas– están recogidas en el presente libro.

Teniendo, pues, como objetivo básico la detección de los procesos mencionados (en particular neutrinos solares y materia obscura), el libro que aquí se reseña reúne un conjunto representativo de las investigaciones –en su mayoría experimentales– realizadas recientemente sobre la posibilidad o factibilidad de dicha detección mediante el uso de dispositivos a muy bajas temperaturas. Las técnicas propuestas y abordadas hasta la fecha, y recogidas en el libro son: 1) Bolometría convencional (o microcalorimetría a muy bajas temperaturas), es decir, el empleo de detectores térmicos sensibles a la pequeña elevación de temperatura producida por el depósito de energía de la partícula, debido al bajo calor específico del cristal detector a tales bajas temperaturas. 2) Los gránulos superconductores metastables (supercalentados) o detectores SSG, microesferas metastables embebidas en un coloide, en las que la mencionada elevación de

la temperatura originada por el depósito energético de la partícula produce un cambio de fase que hace transitar la esfera del estado metastable al normal. Dicho tránsito se detecta mediante el cambio de flujo que la desaparición del efecto Meissner produce en una espira del circuito de lectura que rodea al gránulo, en un campo magnético externo. 3) Las uniones-túnel superconductoras (STJ), en las que las cuasipartículas generadas por la rotura de los pares de Cooper a que da lugar el depósito de energía de la partícula producen una corriente en la unión túnel. 4) Los detectores acústicos de cristal, o bolometría balística, en los que los fonones se detectan mediante las cuasipartículas que engendran en una película superconductora en las caras del cristal y se recogen en uniones túnel colocadas en dichas caras.

Es de señalar que todas estas técnicas se encuentran aún en una fase muy preliminar, es decir, en estado de factibilidad, y lo que el presente libro recoge es el estado actual de las diversas propuestas, la situación y progresos realizados en el conocimiento de los mecanismos físicos en juego y los logros previos de algunos prototipos muy esquemáticos o simplificados, en los que se pretende, más que nada, demostrar que el principio de detección es válido, aunque se sea consciente de que se está aún muy lejos de un dispositivo experimental, operativo, decuado a la detección real de neutrinos y materia obscura.

El libro tiene un excelente prefacio, en el que se recoge la intención de la reunión y sus objetivos. De él se deduce que, casi siempre, se busca la detección de muy pequeños depósitos de energías o de sucesos extremadamente raros, en el límite de la detectabilidad, y que requieren como característica común el empleo de bajas temperaturas y mecanismos físicos de detección distintos de los convencionales de ionización. Tales mecanismos de detección de fonones o de cuasipartículas, debido a la muy inferior energía involucrada en la producción de esas excitaciones –comparada con las ionizaciones de los detectores convencionales electrón-ión o electrón-hueco– permiten augurar muy superiores sensibilidades y resoluciones energéticas, que son requisitos básicos para la detección de pequeños depósitos de energía o de sucesos poco probables.

Todas las técnicas anteriormente mencionadas se dan cita en el libro. En bolometría convencional se recogen los trabajos del grupo de Milán, en cristales de germanio (Fiorini), y los progresos de este grupo en la electrónica de lectura (Camin). Recientes trabajos del grupo de Milán –ulteriores a la publicación del libro– han permitido demostrar la operatividad de bolómetros, de masa de varios gramos (es decir 1000 veces mayores que los habituales), con resoluciones en energía del orden del 1 %. Otros interesantes trabajos sobre bolometría son los del grupo de la Universidad Técnica de Munich (F.V. Feilitzsch) estudiando las propiedades de algunos sensores térmicos (iridio, aluminio), utilizados para la lectura del aumento de temperatura producido en bolómetros por la absorción de la radiación. El grupo del CERN (Niinikoski y Rijllart) analizó las expectativas de detección calorimétrica a baja temperatura de la dispersión elástica coherente neutrino-núcleo mediante la medida del retroceso del núcleo: la parte experimental de este grupo se concentra en prototipos de Si y Ge.

A los detectores de gránulos superconductores, SSG, se les dedica notable extensión, a pesar de las grandes dificultades que presentan en su factibilidad y reproducibilidad. Aunque su resolución en energía no es lo mejor, el hecho de que *a priori* puedan funcionar como una cámara que registra trazas, añade unas propiedades de resolución espacial útiles para identificación y rechazo de fondos. Los circuitos de lectura pueden resultar complejos, porque en detectores realistas los gránulos deben ser del orden de algunas micras. Por otro lado, las temperaturas han de ser de decenas de milikelvin o inferiores y la regularidad de las microesferas –que han de ser producidas en cantidades industriales– deja mucho que desear. Esta dispersión de tamaños degrada algunos parámetros esenciales del detector y es un problema que junto con la eliminación de los fondos radiactivos de todo tipo presentes en el coloide base, en los circuitos de lectura y en los residuos de los aceites tensoactivos usados en la producción industrial de bolas, está aún por resolver. A estos aspectos, y al mejor entendimiento de los mecanismos físicos de estos detectores, se dedican algunas comunicaciones por los grupos de París (ENS y College de France, Waysand, De Bellefon), de Annecy (LAPP, González Mestres y Perret-Galix), de Munich (Pretzl), de la Universidad Técnica de Munich (Feilitzsch) y de Vancouver-Varsovia-Harvard (Kotlicki, Drukier). Los resultados más interesantes se refieren a los experimentos de irradiación sobre SSG de Sn y Cd, a la evidencia de mecanismos de calentamiento local, a la aparición de un efecto avalancha que hay que estudiar adecuadamente en el futuro y a las técnicas de lectura vía SQUID. Por otro lado, los objetivos de estos detectores SSG cubren tanto el dominio de neutrinos –mediante desintegración beta-inversa o dispersión coherente neutrino-núcleo–, como el de materia obscura.

Nuevas e interesantes propuestas son las presentadas por Booth sobre un nuevo detector de indio para neutrinos solares basado en un mecanismo multiplicador de cuasipartículas, y por Seidel, para detección calorimétrica de neutrinos solares mediante la medida del retroceso de los electrones en la dispersión elástica neutrino-electrón, retroceso que aparece como excitaciones de tipo rotor en helio líquido.

La situación de los diversos proyectos y esfuerzos en este tema en USA es revisada por Sadoulet. Por último, algunas de las espectactivas de la aplicación de detectores SSG a otros fenómenos exóticos como la doble desintegración beta se analiza mediante simulación Monte Carlo en un trabajo de la Universidad de Zaragoza.

Para los lectores interesados en este tema, pueden ser de utilidad sesiones del Workshop de enero de 1984, 86 y 87 de las Rencontres de Moriond (Editions Frontieres), las Actas de la Escuela ESO/CERN de los últimos dos años y el Workshop de Torino (octubre 87) sobre detectores superconductores de partículas. La serie sobre este tema iniciada con la publicación del presente libro continuará en años próximos; la correspondiente a 1988, que compila las comunicaciones presentadas a la reunión del grupo europeo de trabajo sobre detectores a baja temperatura para neutrinos y materia obscura, celebrada en Annecy en mayo de 1988, aparecerá publicada en breve y contiene los avances más significativos obtenidos durante el pasado año. (A.M.)

LE METAFISICHE DELL'EMBRIONE. SCIENZE DELLA VITA E FILOSOFIA DA MALPIGHI A SPALLANZANI (1672-1793), por Walter Bernardi. Leo S. Olschki Editores; Florencia, 1986.

No abundan los libros sobre la biología del siglo XVIII, pero los pocos que hay han sido bendecidos por la fortuna. Tres son las obras principales dedicadas a la embriología del setecientos:

Les sciences de la vie dans la pensée française du XVIII^e siècle, de Jacques Roger (París, 1963), *Marcello Malpighi and the evolution of embriology*, de Howard B. Adelmann (Nueva York, 1966) y ésta de Bernardi. Quizás el lector encontrará interesante como trabajo de fondo la exposición, diáfana en su sencilla profundidad, de Shirley A. Roe: *Matter, life and generation. Eighteenth-century embriology and the Haller-Wolff debate* (Cambridge, 1981).

¿Existe, en el embrión, formado ya el individuo en todos sus órganos, de suerte que la gestación no sea otra cosa que el despliegue –la "evolución" decíase entonces– o la manifestación en el tiempo de lo constituido *ab initio*? ¿Ocurre, por contra, que el desarrollo del embrión responde a la producción sucesiva de los órganos que concluirá cuando el feto llegue a término? Los partidarios de dar respuesta afirmativa al primer interrogante se llaman preformacionistas; los del segundo, epigenistas. Destacado jefe de fila de los primeros era Marcello Malpighi; William Harvey comandaba los segundos. Las fronteras no se perfilaban, sin embargo, tan tajantes como pudiera parecernos a simple vista. Y hubo quien, como Albrecht Haller, pasó de defender la teoría preformacionista, cuando era alumno de Boerhaave, al epigenismo, a raíz de sus experiencias con la reproducción de los pólipos (celentéreos capaces de regenerarse tras su amputación), para volver al credo preformacionista por otros experimentos con los huevos de pollo.

Los huevos de pollo han sido históricamente para la embriología lo que la mosca del vinagre, *Drosophila melanogaster*, para la genética cuantitativa desde los tiempos de Thomas H. Morgan. En ellos, en su observación, se han apoyado ambos, preformacionistas y epigenéticos. Constituyen, por otro lado, uno de los primeros objetos de experimentación de la historia de la ciencia. Aristóteles abrió el camino en su libro sexto *De historia animalium*, que le venía sugerido ya por el autor hipocrático del libro *Sobre la naturaleza del niño* (29,2 en la edición de Lonie): "Tómense veinte o más huevos, y pónganse a empollar con dos o más cluecas. Después, a partir del segundo día de incubación, hasta el último, el de la eclosión, se va retirando diariamente un huevo, que se abre, para examinarlo. Se encontrará que todo concuerda con lo que he dicho, hasta el extremo de que la naturaleza de un ave debería ser comparada con la de un hombre". (El lector hallará el texto aristotélico con una glosa pertinente en Rom Harré: *Grandes experimentos científicos*, Labor, Barcelona, 1986, págs. 25-31.)

La embriología no era, ni para los hipocráticos ni para Aristóteles, un asunto secundario, sino que compendiaba el saber biológico. Cuanto de maravilloso encerraba la vida, cuanto la separaba del mundo inerte, se hacía patente en el desarrollo del embrión, fuera éste animal o vegetal. Ahora bien, para los hipocráticos, el individuo se concebía entero porque era un organismo, cuyas partes componentes se explicaban en mutua interrelación; lo que no negaba la evidencia de que los órganos mayores se dejaran ver antes. Aristóteles, epigenista, se funda en sus experimentos con los huevos empollados para desmentir la tesis anterior y ve plasmada en el desarrollo gradual del cuerpo del embrión su definición de la vida como *motus ab intrinseco*. Galeno, heredero de ambas tradiciones, recompone su propia teoría intermedia: el embrión se forma paulatinamente y los órganos que primero vemos son los de mayor tamaño. La autoridad indiscutida de Aristóteles y Galeno, tamizada por la ciencia árabe, llegará más o menos incólume hasta mediados del siglo XVII; aun entonces, la reformulación de la teoría embriológica por Harvey y René Descartes no hará más que reforzar la opinión epigenética.

Hasta que en 1672 Malpighi publica sus experimentos en *De formatione pulli in ovo*, con el respaldo nada despreciable de la Real Sociedad Londinense, y retoma la vieja tesis hipocrática, preformacionista, apoyada ahora con las observaciones del microscopio: en el huevo fecundado estaba esbozado, antes de la incubación, el animal entero. Había que desechar la hipótesis de una producción sucesiva de los órganos y atenerse a lo que nos manifiesta el ocular que no es otra cosa que el mero despliegue de lo que se halla compendiado desde el comienzo.

Bernardi elabora su obra sobre ese doble eje: el ocular y la mente, lo que el ojo ve y la interpretación de los hechos observados. Habría, en su opinión, una lógica o criterio de la visibilidad débil. Y una lógica o criterio de la visibilidad fuerte. Se guiarían por la primera norma los preformacionistas, para quienes habría una discontinuidad entre lo visto y lo real, de suerte que ese hiato sólo se iría acortando con el perfeccionamiento del microscopio; con unas lentes más potentes observaríamos las partes ahora invisibles por su pequeñez o que nos parecen translúcidas. Se guiarían por la segunda norma los epigenistas, quienes abogaban por una correspondencia entre lo manifiesto y lo real; si vemos unas cosas después de otras es porque se originan en sucesión.

Es evidente, pues, que ante una misma observación podían darse interpretaciones opuestas que dependían del bagaje intelectual del experimentador, del color con que se miraba. Y ahí reside la clave del título de la obra: *Metafísicas del embrión*. De acuerdo con los epigenistas, la organización de la vida entraba de lleno en el proceso de la naturaleza y se explicaba por las mismas fuerzas que actuaban en la formación de sales y en el crecimiento de los cristales. Doctrina que encontraba el ambiente favorable entre iatromecánicos e iatroquímicos, que constituían la "modernidad" biológica del XVII. De acuerdo con los preformacionistas, el dominio de la vida era un todo infragmentable e irreductible a meras razones físicas: los lazos entre los distintos órganos de un individuo son tan directos y múltiples, tan estrechos e indisolubles, que nadie puede ofrecer un ejemplo similar en el mundo inerte, arguían con razón. Además, no tenía sentido tildar a los segundos de "aristotélicos", baldón esgrimido en otros terrenos por los "modernos". En este asunto, los aristotélicos eran los fisicalistas en tanto que los preformacionistas, duchos en el manejo del microscopio, apelaban a la observación como criterio último.

La confrontación dura, en la obra de Bernardi, hasta 1793, cuando el abate Spallanzani publica sus trabajos experimentales sobre la formación de los renacuajos. En el debate intervendrá lo mejor de la biología del XVIII: Nicolás Andry, Hermann Boerhaave, Charles Bonnet, Giovanni Borelli, Buffon, Francesco Colonna, Antonio Conti, Felice Fontana, Haller, Vallisneri y *tutti quanti* representan, en papeles más o menos secundarios, la historia de la embriología italiana. Porque esto último es lo que, también, le interesa destacar al autor. ¿Estuvo el país al margen de las ideas científicas del siglo de las luces? La respuesta la dará el lector cuando cierre este magnífico libro.

La comparación con España y sus dominios, en lo relativo a ese período y a la cuestión embriológica, no sabemos si será o no ociosa hasta que alguien se dedique, con la preparación de Bernardi, a develárnoslo. De momento el panorama es desolador. (L.A.)

Apuntes

En 1943, Salvador Luria y Max Delbrück establecieron uno de los principios que han venido guiando, desde entonces, la ciencia de la genética: el entorno intensamente selectivo altera la composición hereditaria de una población bacteriana al permitir que medren sólo los mutantes adaptados a la nueva situación, mutantes que lo fueron ya antes de someterse a la dureza del nuevo medio. La selección natural actuaría en favor de esos mutantes pre-existentes. John Cairns, Julie Overbaugh y Stephan Miller acaban de poner en cuestión ese aserto al demostrar que los individuos mutan contemporáneamente con el medio.

La arqueología no ha prestado atención suficiente a uno de los principales motores de la economía de los pueblos mediterráneos: la muela de moler. Y, sin embargo, en la inmensa mayoría de los yacimientos romanos encontramos algún ejemplar. ¿De dónde venían? De distintos puntos de las colonias. Las españolas procedían, en buena parte, de la región volcánica de Olot, en la actual provincia de Gerona, y se embarcaban, trabajadas unas, en bruto otras, en el puerto de Ampurias

La política científica de aquel gobierno que se obsesione por los resultados industriales de la investigación académica podría estar condenada al fracaso, en opinión del informe anual de este año de la Organización Europea para la Cooperación y el Desarrollo. Las instituciones académicas prefieren una mayor colaboración con centros similares del extranjero que con las industrias nacionales, lo que no casa con planes de campanario o chauvinistas.

No veía Darwin por qué las plantas dioicas resultaban más ventajosas, desde la óptica de la evolución, que las hermafroditas, sus predecesoras. Plantas dioicas son las que se dividen en individuos masculinos y femeninos, en tanto que las hermafroditas son las que tienen ambos sexos en el mismo pie vegetal. Se ha encontrado ya un motivo de esa evolución: la capacidad de supervivencia de las semillas de las hembras dioicas dobla, y casi multiplica por tres, la capacidad de las hermafroditas.

Aunque era conocida la conductividad eléctrica de los polímeros, de la calidad de la que poseen los propios metales, su difícil manipulación impedía la explotación de esta propiedad en los aparatos electrónicos. Ese obstáculo se ha superado con el desarrollo de polímeros precursores solubles, de fácil preparación y manejo antes de convertirlos en su forma conductora.

Nadie más deseado que HUGO, organización para el estudio del genoma humano. En ese ser nonato y ya apadrinado por cinco premios Nobel que están cuidando de su gestación se hallan puestas las esperanzas de la comunidad científica. Es el conócete a tí mismo molecular que por fin va a ser acometido por un equipo internacional, encabezado por James Watson y en el que no interviene España, que avanzará en cinco frentes: creación de un banco de datos, secuenciación y cartografía física del genoma, comparación con otras especies, problemas éticos que plantea la genética molecular e identificación de las enfermedades congénitas.

Las dorsales centro-oceánicas constituyen, geológicamente hablando, el principal rasgo definidor de la Tierra; son, en el marco de la tectónica de placas, centros de dispersión donde se crea litosfera, o capa rígida externa de nuestro planeta. Suponíase que definían un relieve continuo, apenas interrumpido por prolongaciones laterales del centro de dispersión a lo largo de fallas de transformación, que son puntos donde la litosfera ni se crea ni se destruye en el deslizamiento de una placa rígida sobre otra. Pero un primer resultado de la nueva cartografía levantada con los últimos datos batiométricos revela que no existe tal continuidad, sino que hay múltiples interrupciones, hasta el punto de poder hablar de auténtica segmentación de la dorsal

Desde su descubrimiento en 1930, no hemos avanzado gran cosa en el conocimiento de Plutón y de su satélite Caronte. Su masa escasa, la debilidad de su brillo, la inclinación de su órbita con respecto al plano del sistema solar (17,2 grados), su excentricidad (0,250) y alguna propiedad más han inducido a pensar que podría tratarse de un satélite que escapó de otro planeta interior Los estudios centrados en la densidad media del sistema Plutón-Caronte, un par de gramos por centímetro cúbico, abogan sin embargo por un origen solar del décimo planeta.